

**KAYA KÜTLESİ SÜREKSİZLİK YÖNELİMİNİN İNCELEMESİNDE
HAREKET İLE NESNE OLUŞTURMA (SFM)
FOTOGRAMETRİSİNİN KULLANIMINA YÖNELİK BİR
DEĞERLENDİRME**

**AN ASSESSMENT ON THE USE OF STRUCTURE FROM
MOTION (SFM) PHOTOGRAMMETRY IN THE INVESTIGATION
OF ROCK MASS DISCONTINUITY ORIENTATION**

MEHMET ALİ TEMUR

Doç. Dr. Hakan Ahmet NEFESLİOĞLU

Danışman

Doç. Dr. Sultan KOCAMAN GÖKÇEOĞLU

Eş Danışman

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2022

ÖZET

KAYA KÜTLESİ SÜREKSİZLİK YÖNELİMİNİN İNCELEMESİNDE HAREKET İLE NESNE OLUŞTURMA (SfM) FOTOGRAMETRİSİNİN KULLANIMINA YÖNELİK BİR DEĞERLENDİRME

MEHMET ALİ TEMUR

Yüksek Lisans, Jeoloji Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hakan Ahmet NEFESLİOĞLU

Eş Danışman: Doç. Dr. Sultan KOCAMAN GÖKÇEOĞLU

Ocak 2022, 81 sayfa

Bu tez çalışmasının temel amacı Hareket İle Nesne Oluşturma (SfM) fotogrametrisinin süreksizliklere ait geometrik özelliklerin tespitindeki performansının farklı kaya kütleleri ve farklı süreksizlik koşulları için incelenerek, yöntemin olası sınırlamalarının belirlenmesidir. Bu kapsamda, farklı yapısal özelliklere sahip farklı kaya kütleleri üzerinde çalışılmıştır. İlk aşamada hat etütleri gerçekleştirilerek süreksizliklere ait yönelim, aralık, devamlılık, pürüzlülük, ayrışma, açıklık, dolgu ve dalgalılık özellikleri ölçülmüştür. Devamında oluşturulan fotogrametrik modeller üzerinde yapılan yönelim ölçümleri, hat etütünde ölçülen süreksizlik yönelimleri ile karşılaştırılarak sonuçların farklı kayaç türü ve farklı süreksizlik özelliklerine göre değişimleri belirlenmiştir. Sonuç itibarıyla, akıllı telefon ile elde edilen görüntüler ve prizmatik bir kutu ile kısmi şekilde yapılan mutlak yöneltmenin, saha koşullarını temsil edecek hassasiyette nokta bulutu üretebilmek için yeterli olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte çalışma kapsamında kısmi kapalı süreksizlik koşullarındaki yönelim ölçümleri için

LCP+LSPF (Least Cost Path + Least Square Plane Fitting) yöntemi önerilmiştir. Özellikle sedimanter birimlerde hakim olan tabakalanma tipindeki süreksizlikler için bu yöntem önem taşımaktadır. GSI (Geological Strength Index) bazlı yapılan değerlendirmeler sonucunda, süreksizlik yapısı koşullarındaki bloklanma seviyesi arttıkça, bir diğer deyişle kaya parçalarının kenetlenme seviyesi azaldıkça LCP+LSPF kullanımı kaya kütlesinin temsil edilebilirliği için fark edilebilir şekilde ön plana çıkmaktadır.

Anahtar Kelimeler: SfM, Fotogrametri, Hat etüdü, Süreksizlik yönelimi, Düşük maliyetli fotogrametrik yöntemler, nokta bulutu.

ABSTRACT

AN ASSESSMENT ON THE USE OF STRUCTURE FROM MOTION (SfM) PHOTOGRAMMETRY IN THE INVESTIGATION OF ROCK MASS DISCONTINUITY ORIENTATION

MEHMET ALİ TEMUR

Master of Science, Geological Engineering Department

Supervisor: Assoc. Prof. Hakan Ahmet NEFESLİOĞLU

Co-supervisor: Assoc. Prof Sultan KOCAMAN GÖKÇEOĞLU

January 2022, 81 pages

The main purpose of this study is to investigate the potential restrictions of the Structure from Motion (SfM) photogrammetry method in determining the geometric properties of discontinuities for different rock masses and discontinuity conditions. For this purpose, different rock masses having different structural properties were examined through site investigations. The rock mass discontinuity properties such as orientation, persistence, weathering, aperture, filling, roughness, and waviness were measured by applying traditional scan-line surveys at first. Subsequently, photogrammetric surveys were carried out. Both traditionally measured orientations and the values obtained from the point cloud data were compared with respect to different rock masses and different discontinuity conditions. As a result, it was revealed that the use of a smartphone for image acquisition and a prismatic scale box for partial absolute orientation is sufficient to produce point cloud data with reliable precisions for the rock mass discontinuity characterizations. A new procedure namely LCP+LSPF (Least Cost

Path + Least Square Plane Fitting) was suggested for the measurements of the partially closed-trace discontinuities in particular. Since the dominant discontinuity type in the sedimentary formations is the bedding plane, it was concluded that LCP+LSPF method is essential for such types of rock masses. Considering the convenience evaluations based on the GSI (Geological Strength Index) values, it was revealed that as the level of blocking in the structure increases, so as the interlocking of rock fragments decreases, the use of the LCP+LSPF method becomes essential for the representation of the rock masses.

Keywords: SfM, Photogrammetry, Scanline surveys, Discontinuity orientations, Low-cost photogrammetric methods, point cloud.

TEŞEKKÜR

Deęerli katkılarından dolayı danıőmanlarım Sayın Hakan Ahmet NEFESLİOğLU ve Sayın Sultan KOCAMAN GÖKÇEOğLU'na; çalışma boyunca desteğini esirgemeyen YÜKSEL PROJE ailesine; çok sevdiğim kedim MAYA'ya;

Teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
2.2. Mühendislik Jeolojisindeki Fotogrametrik Uygulamalara İlişkin Önceki Çalışmalar	5
3. HAREKETTEN NESNE OLUŞTURMA FOTOGRAMETRİSİ (Structure from Motion).....	11
4. ARAZİ ÇALIŞMALARI	24
4.2. Çalışılan Sahaların Genel Özellikleri	24
4.3. Meteorolojik Özellikler	27
4.4. Genel Jeoloji.....	28
4.4.1. Stratigrafi	29
4.4.1.1. Permo-Karbonifer Yaşlı Kireçtaşı (PCKb).....	31
4.4.1.2. Akbayır Formasyonu (Ja).....	31
4.4.1.3. Karadağ Formasyonu (Kkk)	31
4.4.1.4. Mamak Formasyonu (Tma).....	31
4.4.1.5. Tekke Volkanitleri (Tt)	32
4.4.1.6. Gölbaşı Formasyonu (Tg)	32
4.4.1.7. Alüvyon (Qal)	32
4.5. Hat Etütleri (Scan-line Surveys)	32
4.6. Fotogrametrik Ölçümler	34
5. SÜREKSİZLİK ANALİZLERİ.....	37
5.1. Hat Etüdü Verilerinin Değerlendirilmesi	37
5.1.1. Andezit Türü Kaya Kütlelerinde Yapılan Hat Etüdü Verilerinin Değerlendirilmesi.....	39
5.1.2. Kireçtaşı Türü Kaya Kütlelerinde Yapılan Hat Etüdü Verilerinin Değerlendirilmesi.....	40

5.1.3. Trakeandezit Türü Kaya Kütlelerinde Yapılan Hat Etüdü Verilerinin Değerlendirilmesi	40
5.2. Fotogrametrik Analizler	43
5.2.1. Nokta Bulutu Verisinin Üretilmesi	43
5.2.2. Nokta Bulutu Verisi İle Yapılan Süreksizlik Yönelim Ölçümleri.....	54
5.2.3. Kaya Kütleleri ve Süreksizlik Koşullarının Nokta Bulutu Üzerinden Yapılan Süreksizlik Yönelim Ölçümlerine Etkisi	58
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	69
7. KAYNAKLAR.....	74

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Albrecht Dürer'in perspektif makinesinin kullanımını resmettiği "Man drawing a lute" tablosu (1525).	12
Şekil 3.2. İnsan gözü ve stereoskopik derinlik algısı (Wolf ve ark., 2013).....	13
Şekil 3.3. Stereo görüntü çifti (Stachniss, 2020).	14
Şekil 3.4. (a) Dış yöneltme öncesi ışın demetleri (b) Dış yöneltme sonrası ışın demetleri (Habib, 2016).	15
Şekil 3.5. Epipolar geometri gösterimsel çizim (Szeliski, 2010).	16
Şekil 3.6. Epipolar geometri gösterimsel çizim ve stereo görüntü çifti (Hartley ve Zisserman, 2011'den değiştirilerek).....	16
Şekil 3.7. Mutlak yöneltme (Luhmann ve ark., 2014).	17
Şekil 3.8. Çoklu görüntülere ait ışın desteleri (Luhmann ve ark., 2014).....	18
Şekil 3.9. YKN, bağlama noktaları ve ışın desteleri (Habib, 2018).	19
Şekil 3.10. SIFT algoritması verilen görüntüyü bir anahtar nokta veritabanı haline getirmektedir. Çizgiler anahtar nokta bulunduran alanların (pikseller) yarıçaplarını temsil etmektedir (Westoby ve ark., 2012'den değiştirilerek).....	21
Şekil 3.11. Notre Dame'a ait görüntülerle oluşturulan bağlantısallık grafiği (Snavely ve ark., 2007'den değiştirilerek).	22
Şekil 3.12. Anahtar nokta eşleştirme (Habib, 2018'den değiştirilerek).	22
Şekil 3.13. 370 adet hava fotoğrafı ile oluşturulmuş gevşek nokta bulutu verisi ve bu fotoğraflara ait konumlar (Aber ve ark., 2019'dan değiştirilerek).....	23
Şekil 4.1. Yer bulduru haritası.....	25
Şekil 4.2. Çalışma yapılan andezit türü kaya kütlesi (Yenikent 5. Lokasyon). ..	26
Şekil 4.3. Çalışma yapılan kireçtaşı türü kaya kütlesi (Alacaatlı 2. Lokasyon)..	26
Şekil 4.4. Çalışma yapılan trakeandezit türü kaya kütlesi (Balıkuyumcu 1. Lokasyon).	27
Şekil 4.5. Kimyasal ve mekanik ayrışma seviyeleri (İstanbul Üniversitesi Açık ve Uzaktan Eğitim Fakültesi Fiziki Coğrafya Ders Notları; Peltier 1950'den değiştirilerek).	28
Şekil 4.6. Çalışma alanları ve çevresini gösteren jeoloji haritası (Akyürek ve ark., 1997'den değiştirilerek).....	30

Şekil 4.6. Hat etüdü (a), brunton pusulası ile tabaka ölçümü (b), yapay süreksizlik yüzeyinden yönelim ölçümü (c), profilometre ile pürüzlülük ölçümü (d).	33
Şekil 4.7. Kamera pozisyonları (a); coğrafi kuzeye paralel şekilde yerleştirilen prizmatik karton kutu (b); jeoreferanslama için kullanılan YKN'ler (c).	36
Şekil 5.1. Açık ve kısmi kapalı olarak tanımlanan örnek süreksizlikler.	37
Şekil 5.2. Kaya türü, açık ve kısmi kapalı süreksizlik özelliklerine göre majör süreksizlik setleri.	42
Şekil 5.3. YK-Loc1 Nokta bulutu verisi ve görüntü bindirme oranları.	45
Şekil 5.4. YK-Loc2 Nokta bulutu verisi ve görüntü bindirme oranları.	46
Şekil 5.5. YK-Loc3 Nokta bulutu verisi ve görüntü bindirme oranları.	47
Şekil 5.6. YK-Loc4 Nokta bulutu verisi ve görüntü bindirme oranları.	48
Şekil 5.7. YK-Loc5 Nokta bulutu verisi ve görüntü bindirme oranları.	49
Şekil 5.8. AA-Loc1 Nokta bulutu verisi ve görüntü bindirme oranları.	50
Şekil 5.9. AA-Loc2 Nokta bulutu verisi ve görüntü bindirme oranları.	51
Şekil 5.10. AA-Loc3 Nokta bulutu verisi ve görüntü bindirme oranları.	52
Şekil 5.11. BK-Loc1 Nokta bulutu verisi ve görüntü bindirme oranları.	53
Şekil 5.12. BK-Loc2 Nokta bulutu verisi ve görüntü bindirme oranları.	54
Şekil 5.13. Süreksizlik yüzeyine ait nokta bulutu verisi (a) LSPF yöntemi ile oluşturulan yüzey (b, c).	55
Şekil 5.14. LCP + LSPF uygulaması şematik gösterim.	56
Şekil 5.15. LCP + LSPF nokta bulutu üzerinde uygulama örneği.	57
Şekil 5.16. Farklı yöntemlerin fark miktarlarına ait histogram ve kutu grafikleri.	59
Şekil 5.17. Farklı kaya türlerinin fark miktarlarına ait histogram ve kutu grafikleri.	60
Şekil 5.17. Farklı ayrışma derecelerine göre hesaplanan ölçüm farklarına ait histogram ve kutu grafikleri.	60
Şekil 5.19. JRC değerlerine göre ölçüm farklarını gösteren kutu grafikler; bütün değerler (a); gruplanmış değerler (b).	61
Şekil 5.20. LSPF ve LCP + LSPF yöntemlerinin kaya türlerine göre kullanım oranları.	62
Şekil 5.21. Süreksizlik kutup noktalarının farklı kaya türü, LSPF ve LCP + LSPF yöntemlerine göre yoğunlukları.	63

Şekil 5.22. LSPF ve LCP + LSPF yöntemlerinin kullanılabilirlik oranlarının GSI tablosu üzerinde yapı ve yüzey kalitesine göre gösterimi (Hoek ve Marinos, 2000'den değiştirilerek).....	65
Şekil 5.23. LSPF ve LCP + LSPF yöntemlerine ilişkin kullanım önerilerinin GSI tablosu üzerinde gösterimi (Hoek ve Marinos, 2000'den değiştirilerek).....	66
Şekil 5.24. LSPF yöntemiyle yönelim ölçümünde kullanılan farklı büyüklükteki alanlar.....	67
Şekil 5.25. LSPF yöntemi uygulanan alan büyüklüğü ve RMS değerlerinin değişimleri.	68

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Hat etüdü çalışmaları özet tablosu.....	33
Çizelge 4.2. Görüntü alımında kullanılan kamera özellikleri.....	35
Çizelge 5.1. Hat etüdü özet tablosu.	38
Çizelge 5.2. Nokta bulutu verisi özet tablosu.	44

1. GİRİŞ

Mühendislik yapıları, kaya ortamlarında veya kaya ortamları ile etkileşimli konumlarda inşa edilmeye başladığından beri; kayaların mühendislik özelliklerinin belirlenmesi tartışılmaz öneme sahip olmuş, beraberinde birtakım kavramlar gelişmiştir. Bir kayada çekme dayanımı ihmal edilebilen, mekanik olarak oluşmuş her bir kırık ya da çatlak, süreksizlik olarak tanımlanmaktadır (Priest, 1993). Kaya malzemesi, çekme dayanımının azalmasına sebep olabilecek herhangi bir süreksizlik içermeyen kaya parçası ya da parçaları; kaya kütlesi ise farklı yönlerde gelişmiş süreksizliklerin kaya malzemesi ile birlikte bulunduğu kaya sistemleri olarak ifade edilebilir (Ulusay ve Sönmez, 2007). Kaya kütlelerinin dayanım, içsel gerilme, deformabilite ve permeabilite gibi özellikleri doğrudan süreksizlik etkisi altındadır. Temel olarak süreksizlikler kaya kütlelerinin dayanımını azaltıp, deformabilite ve anizotropisini artırır; kaya kütleindeki bütün gerilme dağılımını karmaşık bir şekilde değiştirebilirler (Goodman, 1989). Dolayısıyla bir kaya kütlelerinin mühendislik/mekanik davranışı, süreksizliklerin mühendislik/mekanik özellikleri dikkate alınmadan belirlenemez. Kaya kütlelerine ait süreksizlik özellikleri, kaya yüzlekleri ya da sondaj karotları üzerinde yapılan ölçümler ile belirlenmektedir. Kaya yüzleklerinden alınan süreksizlik ölçümleri, gerek yerüstü gerek yeraltında, geniş yüzeylerden faydalanabilme avantajı sebebiyle süreksizlik yönelimi, süreksizlik boyutu ve diğer büyük ölçekli geometrik özelliklerin doğrudan tespit edilmesine olanak sağlar. Hat etüdü (*scanline surveys*) ve pencere haritalaması/örnekleme (*window sampling*) bu ölçümler arasında en yaygın kullanılan yöntemlerdir (Priest, 1993). Hem hat etüdü hem pencere haritalama/örnekleme yöntemlerinde süreksizliklere ait özellikler (yönelim, aralık ve devamlılık) jeolojik pusula ve şerit metre kullanılarak ölçülmektedir. Bu ölçümler gerek yöntem ve örnekleme gerekse aletsel temelli çeşitli sınırlama ve dezavantajlara sahiptir. Özetlemek gerekirse:

- Yoğun iş gücü tüketen ve zaman alıcı yöntemlerdir (Cao ve ark., 2017). Dolayısıyla masraflıdırlar.

- Bazı kaya yüzleklerinin üst kesimlerine tırmanış ekipmanı olmadan fiziksel erişim mümkün olmayabilir (Kemeny ve Post, 2003). Erişimin mümkün olduğu koşullar ise her zaman güvenli olmayabilir (Gaich ve ark., 2006).
- Yöntemler hassasiyet eksikliği yaratacak şekilde kişisel bilgi ve tecrübeye bağlıdır (Feng ve Röshoff, 2015). Bu durum ölçümlerin standartlaştırılmasını güçleştirmekte, kişi bazlı ölçüm hatalarına sebep olabilmektedir.
- Demir boru hatları ya da ray gibi malzemelerin sebep olduğu manyetik sapmalar ile metalik madenlerin sebep olduğu anomaliler pusula okumalarının doğruluğunu etkileyebilmektedir (ISRM, 2007).

Özetlenen bu dezavantaj ve sınırlamalar, süreksizlik özelliklerinin tespit edilmesi konusunda geleneksel yöntemlere alternatif oluşturacak yeni yöntem arayışlarına sebep olmuştur. Fotogrametrik yöntemlerin bu arayışa cevap verecek şekilde kullanımı Linkwitz (1963; Gaich ve ark., 2003'den) ve Rengers (1967) gibi örneklerde görüleceği üzere 1960'lı yıllara kadar uzanmaktadır. ISRM (1977) kaya kütlesi ve onu oluşturan diğer özelliklerin tanımlanması için kullanılan yöntemler arasında analog fotogrametriye yer vermiştir. Günümüze bakıldığında, ortaya çıkışından bu yana geçen on yıl içerisinde hava (*aerial*) ve yakın mesafe (*close-range*) dijital fotogrametrisi üç boyutlu topografik modelleme için güçlü ve yaygın olarak kullanılan bir araç haline gelmiştir (Westoby ve ark., 2012). Bu duruma bağlı olarak kullanımı artan yöntemlerden biri de hareket ile nesne oluşturma [Structure from Motion (SfM)] fotogrametrisidir. Esasen başlangıçta bina ve arkeolojik yapıların 3 boyutlu cephe rekonstrüksiyonları için tasarlanan yöntem, tek bir kaya numunesinden bütün bir araziye varan ölçekleme aralığında pratik ve etkin maliyetli haritalamalar yapılmasına olanak sağladığı için yer bilimleri ve mühendisliğinde son zamanlarda başarıyla kullanılmaktadır (Lucieer ve ark., 2014). Bunun yanında SfM fotogrametrisinin yer bilimleri ve mühendisliğindeki bir diğer kullanım alanı da mühendislik jeolojisidir. Yöntem bir kaya yüzleğinin 3 boyutlu olarak modellenmesine olanak sağladığı için kaya kütle

karakterizasyonu ve süreksizlik özelliklerinin tespitinde de kullanılabilmekte olup (Roncella ve ark. 2005; Greenwood ve ark., 2016; Cawood ve ark., 2017; Vanneschi ve ark., 2017; Erharter ve ark., 2018; Sayab ve ark., 2018; Tung ve ark., 2018; Vanneschi ve ark., 2019; Menegoni ve ark., 2019; Zhang ve ark., 2019), özellikle son beş yıl içerisinde mühendislik jeolojisi alanında sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Literatürde SfM fotogrametrisinin süreksizliklere ait geometrik özelliklerin tespitinde başarılı şekilde kullanıldığı vaka çalışmaları mevcuttur; ancak yöntemin farklı jeolojik birimlerin ya da farklı yapısal özelliklerin söz konusu olduğu durumlardaki performans ve sınırlamalarının değerlendirildiği herhangi bir araştırma bulunmamaktadır. Literatürdeki bu eksiklikten hareketle, bu tez çalışması kapsamında aşağıdaki araştırma sorularına ait cevaplar aranmıştır:

- SfM fotogrametrisinin farklı kayaç türlerinde yer alan süreksizlik setlerine ait geometrik özelliklerin belirlenmesi konusundaki performansı nasıl değişimler göstermektedir?
- SfM fotogrametrisinin farklı yapısal özellikteki süreksizlik setlerine ait geometrik özelliklerinin belirlenmesi konusundaki performansı nasıl değişimler göstermektedir?
- SfM fotogrametrisinin farklı bozunma seviyesindeki süreksizlik setlerine ait geometrik özelliklerinin belirlenmesi konusundaki performansı nasıl değişimler göstermektedir?

Bu tez çalışmasında özetle, farklı kayaç türü, farklı yapısal özellikteki süreksizlikler ve farklı bozunma seviyelerinin söz konusu olduğu durumlarda SfM fotogrametrisinin süreksizlik özelliklerinin belirlenmesi konusundaki performansının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda Geological Strength Index (GSI), (Hoek ve Marinos, 2000) değeri 15 ile 85 arasında değişen magmatik ve sedimanter kaya kütlelerindeki farklı yapısal özellik ve yüzey koşullarına sahip süreksizlikler değerlendirilmiştir. İnceleme yöntemi temel olarak

hat etüdü ve SfM fotogrametrisi ile elde edilen süreksizlik yönelimlerinin karşılaştırılması esasına dayanmaktadır. Öncelikle saha çalışmaları gerçekleştirilmiş, bu kapsamda hat etütleri yapılarak ISRM (2007) standartları dikkate alınarak süreksizlik özellikleri ölçülmüştür. Sonraki aşamada hat etüdü yapılan mostralara SfM fotogrametrisi ile 3 boyutlu olarak modellenmiş, oluşturulan modeller üzerinden süreksizliklere ait yönelim özellikleri tespit edilmiştir. Son aşamada SfM fotogrametrisi ile oluşturulan modeller üzerinde tespit edilen yönelimler, hat etüdünde ölçülen süreksizlik yönelimleri ile karşılaştırılarak SfM fotogrametrisinin başarısı değerlendirilmiştir. Yöntemin başarısındaki değişim kayaç türü, süreksizliklerin yapısal özellikleri ve bozunma seviyesi açısından tartışılarak, SfM fotogrametrisinin mühendislik jeolojisi çalışmalarında kullanılabilirliği GSI tablosu üzerinden sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.2. Mühendislik Jeolojisindeki Fotogrametrik Uygulamalara İlişkin Önceki Çalışmalar

Ross-Brown (1973) tarafından 20'den fazla açık ocak maden işletmesinde yapılan çalışma, kaya kütlelerine ait yapısal unsurların fotogrametrik yöntemlerle tespit edildiği ilk çalışmalardan bir tanesidir. Çalışmada sağ ve sol stereo çift olarak yerleştirilmiş kameralar kullanılarak elde edilen bindirmeli görüntülerle kaya mostrası stereoskopik olarak modellenmiştir. Oluşturulan stereoskopik modelin dış yöneltme işlemi için, sağ ve sol kameranın konumları ile birlikte 4 farklı referans noktası kullanılmıştır. Referans noktalarına ait konumlar foto-teodolit kullanılarak ölçülmüştür. Yöneltme yapılan stereoskopik modelde gözlemlenen süreksizlikler üzerinde stereokomparatör yardımıyla x, y, z koordinatları bilinen noktalar oluşturularak en küçük kareler yöntemi ile süreksizlik düzlemleri oluşturulmuş ve bu yüzeylerin yönelimleri ölçülmüştür. Süreksizlik düzlemleri oluşturulurken minimum 4 nokta kullanılmış olup, ölçümlerin 5°'lik hassasiyetle gerçekleştiği saptanmıştır. Çalışma sonucunda analog fotogrametrik yöntemin süreksizlik yönelimlerinin ölçümüne ilişkin sahip olduğu avantaj ve dezavantajlar tespit edilmiştir. Fotogrametrik yöntemdeki ölçüm hatalarının genellikle kaba hatalar (gross errors) olması ve bu hataların kolaylıkla tespit edilip düzeltilebilmesi fotogrametrik yöntemin başlıca avantajlarından biri olarak sunulmuştur. Süreksizlik yönelimlerinin pusula ölçümünde karşılaşılan hataların ise tespit edilmesi daha güç olan tekil hatalar olduğu ifade edilmiştir. Çalışmaya göre sıklıkla karşılaşılan tekil hatalar pusulada manyetik sapmanın söz konusu olduğu durumlarda değil, süreksizlik düzlemlerinin nispeten küçük olduğu ve pusula hizalamasının zor olduğu durumlarda meydana gelmektedir. Bu sebeple kullanılan fotogrametrik yöntemin, pusula ile gerçekleştirilen ölçümlere kıyasla daha avantajlıdır. Çalışma kapsamında fotogrametrik yöntemle ilişkin saptanan dezavantajların başında süreksizliklerin bazı yapısal özelliklerinin yarattığı etki gelmektedir. Çok ayrışmış ve dalgalı süreksizliklerde yöntemin başarısı azalmaktadır. Bununla birlikte süreksizlik düzlemlerinin kamera odak düzlemi ile yaptığı açı, kamera konumlarının süreksizlik düzlemine olan uzaklığı,

kullanılan kameranın odak uzunluğu ve ortamın ışık durumu gibi unsurlar da fotogrametrik ölçüm performansını etkilemektedir.

Lee ve ark. (2000) tasarladıkları kamera yerleşim sistemi ile stereofotogrametrik model oluşturarak öncelikle iç mekanda, sonrasında ise 3 farklı sahada süreksizlik yönelimlerini ölçmüşlerdir. Bu yerleşim sistemi özetle, tripod üzerine yerleştirilen yatay bir bar üzerindeki kameranın düşeyde hareket etmeksizin yalnızca yatayda hareket ederek sağ ve sol stereo çift görüntüler alması üzerine kurulmuştur. Görüntü alma işlemi sırasında 3 değer ölçülmüştür. Bunlar; kullanılan kameranın odak uzaklığı, kameranın süreksizlik düzlemine olan uzaklığı ve stereo görüntüyü alan sağ ve sol kameraların birbirlerine olan uzaklıklarıdır. Daha sonra bu 3 değer kullanılarak stereo çift olarak çekilip birbirleri üzerinde bindirilen görüntülerdeki süreksizlik düzlemleri üzerinde belirlenen noktaların 3 boyuttaki koordinatları elde edilmiştir. Koordinatları bilinen bu noktalar üzerinde, Fortranda kodlanmış Stereo isimli yazılım kullanılarak süreksizlik düzlemleri oluşturulmuş ve bu düzlemlere ait eğim-eğim yönü değerleri hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda hesaplanan eğim-eğim yönü değerleri, aynı yerlerden pusula ölçümleri ile alınan eğim-eğim yönü değerleri ile karşılaştırılarak yöntemin başarısı araştırılmıştır. İç mekan ölçümlerinde 2 farklı görüntü alma tipi kullanılmıştır. Tip-1'de kamera eksenini yataya paralel iken Tip-2'de yatay ile 20°'lik açı yapacak şekildedir. Eğim değerleri için 360° üzerinden hesaplanan hata kareleri ortalaması (MSE) Tip – 1 için 3.4°, Tip – 2 için 5.3°'dir. Eğim yönü değerleri için ise hata kareleri ortalaması (MSE) 180° üzerinden hesaplanmış olup hem Tip – 1 hem Tip – 2 için 1.6° olarak belirlenmiştir. Saha çalışmalarında ise pusula ile ölçülen eğim ve eğim yönü değerleri aralık olarak belirlenmiş olup; stereofotogrametrik yöntemlerle ölçülen 36 adet eğim – eğim yönü değerininin 24 adedi pusula ölçümleri ile belirlenen bu aralıklar içerisinde yer almıştır. Aralık içerisinde yer almayan eğim – eğim yönü değerleri ise $\pm 1^\circ$ 'lik farkla aralık dışında kalmıştır. Çalışma sonucunda pusula ve stereofotogrametrik yöntemler ile ölçülen süreksizlik yönelimlerine ait farkların kabul edilebilir olduğu ifade edilmiştir.

Gaich ve ark. (2001) bilgisayarlı görü (computer vision) ve fotogrametriyi beraber kullanarak bir tünel aynasını 3 boyutu olarak modellemiş ve süreksizliklere ait bazı geometrik özellikleri tespit etmiştir. Çalışmada kullanılan kaya kütesine ait görüntüler panoramik çizgi tarayıcı kameralar ile stereo çift olarak kaydedilmiştir. Panoramik kameraların kullanılmasının nedeni kolaylıkla yüksek hız ve kalitede stereoskopik yerleşime uygun olarak geniş açıda görüntü alabilmesi olarak ifade edilmiştir. Kameralara ait iç ve dış yöneltme işlemleri gerçekleştirildikten sonra sırasıyla; görüntü eşleme, nokta bulutu (point cloud) ve üçgenlenmiş düzensiz ağ [triangulated irregular networks (TIN)] oluşturma adımları uygulanmıştır. Bu adımlar sonucunda elde edilen 3 boyutlu model üzerinde yatayda 276, düşeyde 289 adet süreksizlik için devamlılık (trace length), aralık ve yönelim değerleri elde edilmiştir. Süreksizlik aralık değerlerinin negatif eksponansiyel dağılım gösterdiği tespit edilmiştir. Çalışmada dış yöneltme işlemi uygulanırken kullanılan referans noktaları coğrafi koordinat sistemi üzerinden koordinatlandırılmadığı için süreksizlik yönelimleri 3 boyutlu model içerisinde bağıl olarak (relative orientation) ölçülmüştür.

Ronchella ve ark. (2005) süreksizlik yönelimlerinin tespiti için pusula ile yapılan ölçümlere alternatif olacak ucuz ve pratik bir yöntem arayışına girerek fotogrametrik metotların kullanıldığı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Corma di Machaby'de (İtalya) bulunan kaya şevinde yaptıkları çalışmada bindirmeli olarak alınmış görüntüler yardımıyla oluşturdukları dijital yüzey modeli (DYM) üzerinde süreksizlik düzlemlerinin eğim ve eğim yönü değerleri ölçülmüş, bu değerler pusula aracılığıyla gerçekleştirilen ölçümlerle karşılaştırılmıştır. DYM oluşturmak için kullanılan fotoğrafların bir kısmı yerden bir kısmı ise (40 adedi) helikopter ile havadan çekilmiştir. Yerinde pusula ile yapılan ölçümlerde 190 adet süreksizlik yönelimi ölçülmüş olup, ölçümler mühendislik jeologlarının yönetimindeki profesyonel tırmanıcılar tarafından gerçekleştirilmiştir. Yerden ve havadan bindirmeli olarak elde edilen görüntüler üzerinde SfM fotogrametrisi kullanılarak DYM oluşturulmuştur. Jeoreferanslama işlemi için şev yüzeyinden reflektörsüz teodolit ile belirlenen yer kontrol noktaları (YKN) kullanılmıştır. Oluşturulan DYM üzerinde RANSAC (random sample consensus) algoritması kullanılarak süreksizlik düzlemleri tespit edilmiş ve bu düzlemlerin eğim ve eğim yönü

değerleri ölçülmüştür. Çalışma sonucunda DYM üzerinden ölçülen eğim-eğim yönü değerlerinin pusula ölçümleriyle kıyaslandığında başarılı sonuçlar sunduğu verdiği ifade edilmiştir.

Firpo ve ark. (2011) Carrara Mermer Ocağı'nda (İtalya) yaptıkları çalışmada fotogrametrik yöntemler kullanarak süreksizlikleri tespit ederek devamlılık, yönelim ve aralık değerlerini ölçmüşlerdir. Süreksizlikler ayırık elemanlar yöntemi kullanan 3DEC yazılımıyla modellenerek, şev stabilitesi analizleri gerçekleştirilmiştir. Fotogrametrik yöntemlerde kullanılan fotoğrafların bir kısmı zeminden bir kısmı ise aerostatik balonlar yardımıyla havadan çekilmiştir. Bunun birlikte dış yöneltmede kullanılmak üzere şev yüzeyinde YKN'ler belirlenmiş ve bu YKN'lere ait koordinatlar reflektörsüz total station yardımıyla okunmuştur. Elde edilen görüntüler üzerinde yapılan dış yöneltme sonucunda kök ortalama kare hata (RMSE) yaklaşık 5 cm olarak hesaplanmıştır. Devamında Erdas Imagine yazılımının Stereo Analyst modülü kullanılarak stereoskopik model ve SYM oluşturulmuş, SYM modeli üzerinden süreksizlik yönelimleri ölçülmüştür. Bu ölçümler ArcGIS yazılımının Aspect ve Slope araçları kullanılarak en küçük kareler pencere eşleşmesi [least squares window matching, (Ackermann, 1984)] tekniğiyle ölçülmüştür. Toplamda bütün şev yüzeyinde 635 adet süreksizlik yönelimi ölçülmüş olup, bunlardan 193 tanesinin bulunduğu topuk bölgesinde pusula ile yerinde ölçüm de alınmıştır. Topuk bölgesindeki bu yönelim ölçümleri karşılaştırıldığında SYM üzerinden gerçekleştirilen ölçümler ile pusula ile yerinde gerçekleştirilen yönelim ölçümlerine ait stereografik projeksiyonların uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan topuk bölgesindeki 193 adet süreksizlik yönelimine ait stereografik projeksiyonların, SYM üzerinden şev yüzeyinin tamamını temsil edecek şekilde ölçülen yönelimlere ait stereografik projeksiyonlar ile de uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Buradan hareketle topuk bölgesindeki hakim süreksizlik setlerinin yönelim itibarıyla bütün şev yüzeyindeki süreksizlikleri temsil edebildiği ifade edilmiştir. Bununla birlikte SYM üzerinden ölçülen süreksizlik devamlılık değerleri topuk bölgesinde yerinde ölçülen devamlılık değerlerinden fazla; aralık değerleri ise fazladır. Bu durumun SYM'nin yalnızca topuk bölgesi değil bütün şev yüzeyini, bir diğer deyişle farklı tektonik rejimlere maruz kalan bölgeleri de temsil etmesinden kaynaklandığı ifade

edilmiştir. Çalışmanın son aşamasında ise geometrik özellikleri tespit edilen süreksizlikler 3DEC yazılımında şev ile birlikte modellenmiş ve şevin nümerik olarak daha hassas şekilde temsil edilmesine imkan tanımıştır.

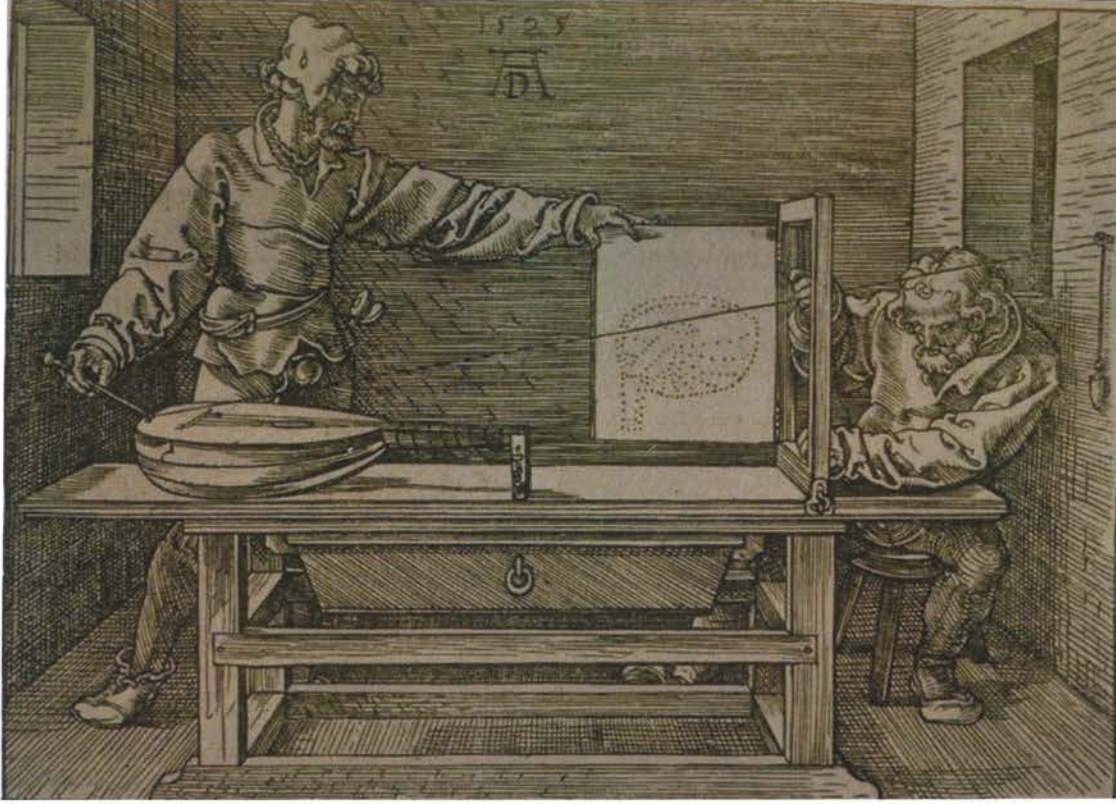
Cawood ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada tabaka yönelimlerinin tespit edilmesinde kullanılan bazı yöntemleri karşılaştırmışlardır. Bunlar; yersel lazer tarayıcı (lidar), yersel fotogrametri, insansız hava aracı (İHA) bazlı fotogrametri, brunton pusulası ile yerinde ölçüm ve Clino isimli akıllı telefon uygulaması ile yerinde yapılan ölçüm yöntemleridir. Çalışma Pembrokeshire'da (Galler) bulunan bir senkline üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yerinde yapılan ölçümlerde öncelikli olarak brunton pusulası ile süreksizlik yönelimleri ölçülerek, bu değerler diğer yöntemlerle yapılacak karşılaştırılmada baz olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda 8 saatte 425 adet süreksizlik yönelimi ölçülmüştür. Akıllı telefon uygulaması Clino ile yapılan ölçümler ise 3 saat sürmüş, 625 adet süreksizliğin yönelim değerleri ölçülmüştür. Uzaktan alınan ölçümlerde ise; karasal Lidar ile kaya kütesinden ortalama 150 m uzaklıkta 5 saatte 10 adet tarama gerçekleştirilmiştir. Alınan ölçümlerden nokta bulutu verisinin üretilmesi yaklaşık olarak 35 saat sürmüştür. Yersel fotogrametri ölçümleri için 1 saat 30 dakikada 27 farklı kamera pozisyonundan toplamda 724 adet fotoğraf çekilmiş, bu fotoğraflardan nokta bulutu verisinin üretilmesi için ise 8 saatlik bir çalışma yapılmıştır. İHA bazlı fotogrametri ölçümleri için yarım saatlik uçuş ile toplamda 202 adet fotoğraf çekilerek, 8 saatlik bir veri işleme sürecinin ardından nokta bulutu verisi oluşturulmuştur. İHA bazlı ve yersel fotogrametri ölçümlerinden nokta bulutu verisinin üretilmesi için SfM fotogrametrisi kullanılmıştır. Jeoreferanslama işlemi yersel lidar ve İHA için yerleşik GPS sistemi ile, yersel fotogrametri için 6 adet YKN kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın son adımında fotogrametrik yöntemlerle senkline ait olarak elde edilen nokta bulutu verileri üzerinden ölçülen tabaka yönelimleri ve akıllı telefon uygulaması Clino ile yapılan ölçümler, brunton pusulası ile ölçülen yönelim değerleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma için 6 farklı tabaka düzlemi belirlenmiştir. Yerinde yapılan iki yöntem, Clino uygulaması ve brunton pusulası ile yapılan ölçümler karşılaştırıldığında $3^{\circ} - 7^{\circ}$ sapma tespit edilmiştir. Uzaktan ve yerinde yapılan yöntemler karşılaştırıldığında, yersel lidar ile oluşturulan nokta bulutu verileri

üzerinden ölçülen yönelimlerin en yüksek hassasiyete sahip olduğu tespit edilmiştir. Yersel lidar ile oluşturulan nokta bulutu verileri üzerinden 6 kontrol tabakası için ölçülen yönelimlerin brunton pusulası ile ölçülen yönelim değerlerinden $2^{\circ} - 5^{\circ}$ farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Yersel fotogrametriye gelindiğinde, 6 kontrol tabakasından 3 adedi için ölçülen yönelimler brunton pusulası ile ölçülen yönelim değerlerinden $4^{\circ} - 5^{\circ}$ farklılık gösterirken, diğer 3 tabaka için bu farklılıklar 70° 'ye kadar ulaşmaktadır. İHA bazlı fotogrametri ile oluşturulan nokta bulutu verileri üzerinden ölçülen yönelimler ise 5 adet kontrol tabakası için brunton pusulası ile ölçülen yönelim değerlerinden $3^{\circ} - 9^{\circ}$ farklılık göstermiş, yalnızca 1 tabaka için bu değer 42° olarak ölçülmüştür.

Öztürk ve ark. (2019) yaptıkları çalışmada Kapadokya İhlara Vadisi'nde bulunan sütunsal ignimbirlere ait süreksizlik yönelimlerini akıllı telefon aracılığıyla çekilen fotoğraflar ile fotogrametrik yöntemler kullanarak belirlemiş, sonrasında devrilme riskini kinematik olarak incelemişlerdir. Çalışmanın saha incelemesi safhasında yarım saatlik bir süre zarfında toplamda 677 adet fotoğraf çekilmiş veri işleme sürecinde bu fotoğraflardan 55 adedinin kullanılmasına karar verilmiştir. Öte yandan çalışma için YKN üretmek amacıyla 2015 yılında gerçekleştirilen bir hava fotogrametrisi uçuşu esnasında büyük formatlı kamera ile çekilmiş, 30 cm yersel çözünürlüklü %60 bindirmeli stereo görüntü çiftinden yararlanılmıştır. Dış yönelimde kullanılmak üzere, hem hava fotoğraflarında hem de akıllı telefon görüntülerinde bulunacak şekilde belirlenen 5 adet nokta (bitki, kaya yüzeylerinin köşeleri vb.) YKN olarak seçilmiştir. Nihai olarak 2 m mutlak hassasiyetle oluşturulan yoğun nokta bulutu üzerinde Cloud Compare yazılımı kullanılarak 4 farklı sektörde 4 adet süreksizlik seti belirlenmiştir. Süreksizlik setleri belirlenirken aynı zamanda, vadideki şev yönelimlerini temsil edecek şekilde ayrılmış 4 farklı segmente göre sınıflandırılmıştır. Çalışmanın son adımında her bir şev segmenti ve o segment için sınıflandırılan süreksizlik setleri kullanılarak kinematik analizler yapılmış, devrilme tipi yenilme riski taşıyan süreksizlik setleri belirlenmiştir. Çalışma, erişimi zor bir kaya kütesinde yer alan süreksizlik yönelimlerinin tespit edilmesi adına son derece pratik ve düşük maliyetli bir çözüm sunmaktadır.

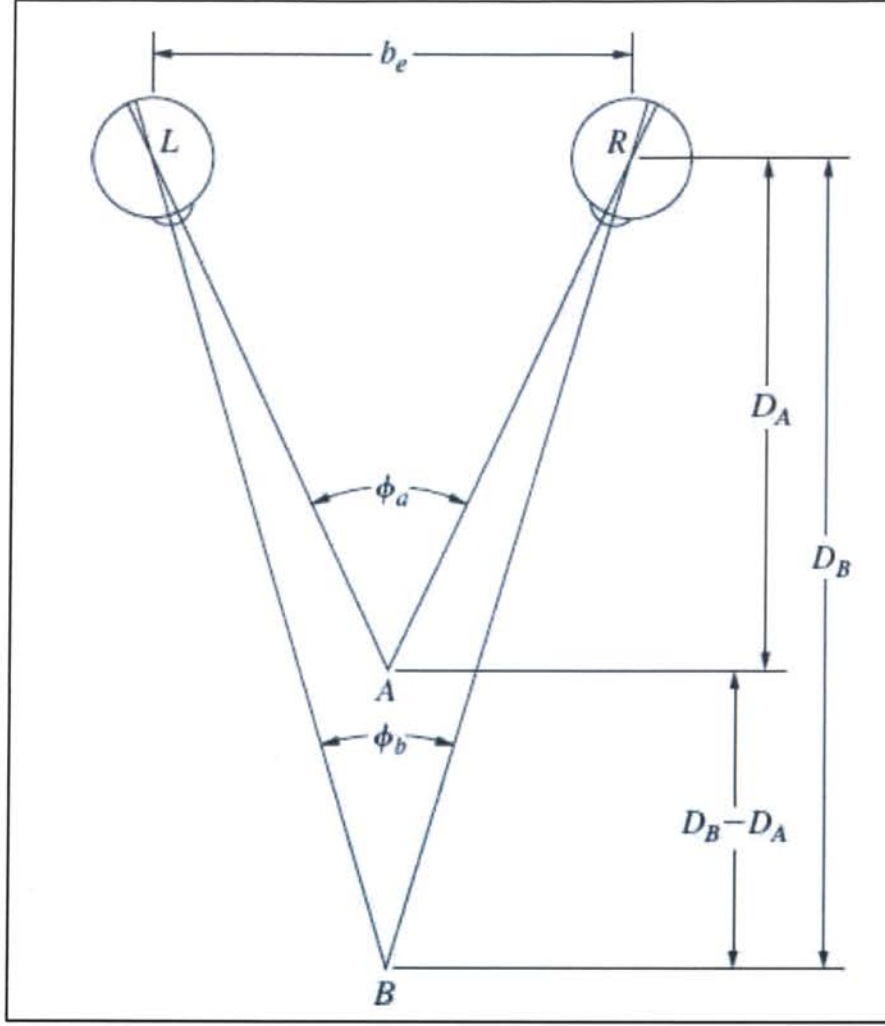
3. HAREKETTEN NESNE OLUŞTURMA FOTOGRAMETRİSİ (Structure from Motion)

Fotogrametri genel anlamıyla, fotoğraflardan mekânsal ölçümler ve geometrik olarak güvenilir ürünlerin elde edildiği bir bilim ve teknolojidir (Lillesand ve ark., 2015). Perspektif geometrinin kullanımı İtalyan rönesansına ((Brunnelleschi (1420), Piero della Francesca (1470), Leonardo da Vinci (1481) ve Dürer (1525)) dayansa da, pratik bir araç haline gelmesi fotoğrafın icadı ile birlikte gerçekleşmiştir (Konecny, 2019). 1830 ve 1840'lı yıllarda Fox Talbot'un İngiltere'de, Niépce ve Daguerre'ün Fransa'da yapmış oldukları fotoğraf buluşlarından yalnızca birkaç yıl sonra 1849'da, askeri topoğraf Aimé Laussedat Hotel des Invalides'e ait cephe görüntüleri üzerinde bazı perspektif ölçümler almayı başarmıştır (Luhmann ve ark., 2014). Fotogrametrinin esas amacı 2 boyutlu fotoğraflar üzerinden 3 boyutlu nesne ve arazi unsurlarının hassas şekilde ölçülmesidir (Aber ve ark., 2019). Bu amaç doğrultusunda fotogrametri bazı gelişim evreleri geçirmiştir. Fotoğraflar üzerindeki ölçümlerin tamamen optik-mekanik araçlar ile gerçekleştirildiği analog fotogrametri evresini, ölçümlerin bilgisayar bazlı sayısal analizlerle gerçekleştirildiği analitik fotogrametri evresi takip etmiştir. Gelişimin son aşaması ise dijital fotogrametridir. Dijital fotogrametride kamera odak düzlemine düşen ışık, görüntü olarak kaydedilirken ışığa duyarlı filmler değil elektronik detektörler kullanılmaktadır (Kraus, 2011). Bir diğer deyişle dijital fotogrametride ölçüm için kullanılan görüntüler tamamen dijital (softcopy) olarak elde edilmektedir.



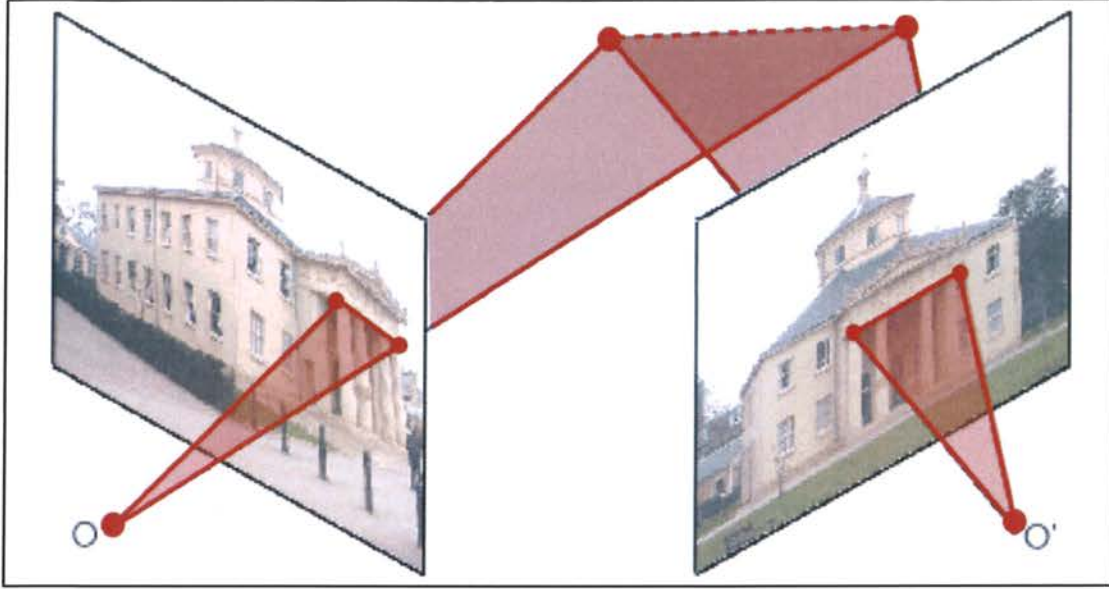
Şekil 3.1. Albrecht Dürer'in perspektif makinesinin kullanımını resmettiği "Man drawing a lute" tablosu (1525).

Fotogrametri yöntemleri ile yapılan ölçümler bazı temellere dayanmaktadır. Tek bir görüntü (2 boyutlu bir düzlem) üzerinde yapılan ölçümlerden yalnızca 2 boyutlu koordinatlar elde edilebilir (Linder, 2009). Bu nedenle bir nesne ya da araziye ait 3 boyutlu koordinatlar elde etmek isteniyorsa ölçeği, konumu, çözünürlüğü ne olursa olsun tek bir görüntü yeterli olmayacaktır. Fotogrametride 3 boyutlu ölçümlerin yapılabilmesine olanak sağlayan prensip insanın görme prensibi ile aynıdır. Gözlerimizin farklı bakış açılarından sağladığı bindirmeli görüntüler sayesinde çevremizi 3 boyutlu görme yetisine bir diğer deyişle derinlik algısına sahibizdir (Aber ve ark., 2019). Her iki gözün aynı anda görebilme yetisi ile sağlanan "stereokospik" görüş sayesinde Φ_a açısının Φ_b açısından daha büyük olduğunu algılayabilen insan beyni, A noktasının B noktasından daha yakın olduğunu da (derinlik algısını) otomatik olarak tespit edebilmektedir (Şekil 3.2.).



Şekil 3.2. İnsan gözü ve stereoskopik derinlik algısı (Wolf ve ark., 2013).

Stereoskopik görüşün fotogrametrideki uygulaması bindirmeli fotoğraflar ile gerçekleştirilmektedir. Bunun sebebi fotoğraf üzerindeki bir noktanın konumunun tespit edilebilmesi için vektörel olarak tek bir ışık ışınının yeterli olmaması, 2 ya da daha fazla kesişen ışık ışınına ihtiyaç duyulmasıdır. Özetle, bindirmeli iki (ya da daha fazla) görüntüye sahip olduğunda, her iki görüntüde de bulunan bir noktanın 3 boyuttaki koordinatları hesaplanabilmektedir (Linder, 2009). Bu hesaplama için sağlanan görüntüler stereo görüntü, bu görüntülerle oluşturulan model stereo model olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3.3.)



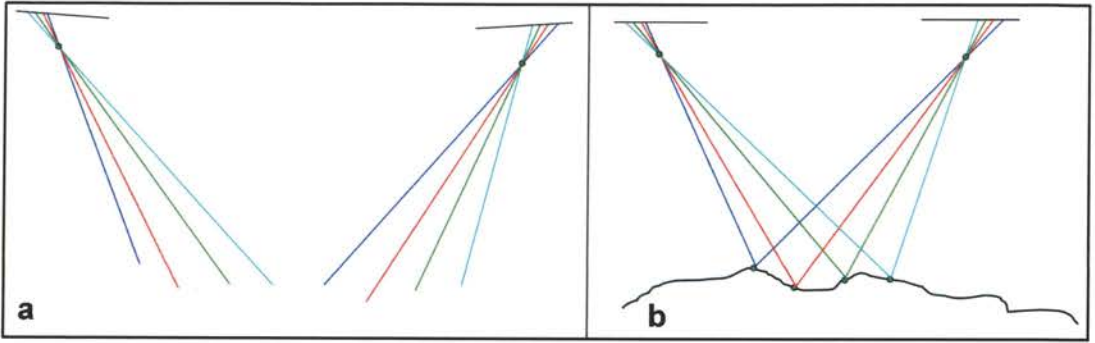
Şekil 3.3. Stereo görüntü çifti (Stachniss, 2020).

Bir stereo modelin elde edilmesi için görüntüler üzerinde yöneltme adımlarının uygulanarak bazı özel koşulların oluşturulması gerekmektedir. Yöneltme, görüntülerin çekim anındaki konum ve dönüklüklerinin yeniden elde edilmesi işlemi olarak özetlenebilir. İç ve dış yöneltme olarak iki ana adımda gerçekleştirilmektedir.

İç yöneltme, kamera içindeki 3B uzayın parametrelerinin elde edilmesi için gerçekleştirilir ve en temel olarak görüntü asal noktası koordinatları, odak uzaklığı ve distorsiyon parametrelerinin elde edilmesini sağlayan kamera kalibrasyon prosedürü ile gerçekleştirilir. İç yöneltme parametreleri yaygın kullanıcı sınıfı kameralarda sürekli değişkenlik gösterdiğinden (kalibrasyon kaybı) fotogrametrik ölçüm öncesi muhakkak tespit edilmelidir. Bu açıdan bakıldığında, özel olan metrik kameralarda iç yöneltme parametrelerinin kısa vadede sabit olduğu ve değişmeyeceği kabul edilebilir.

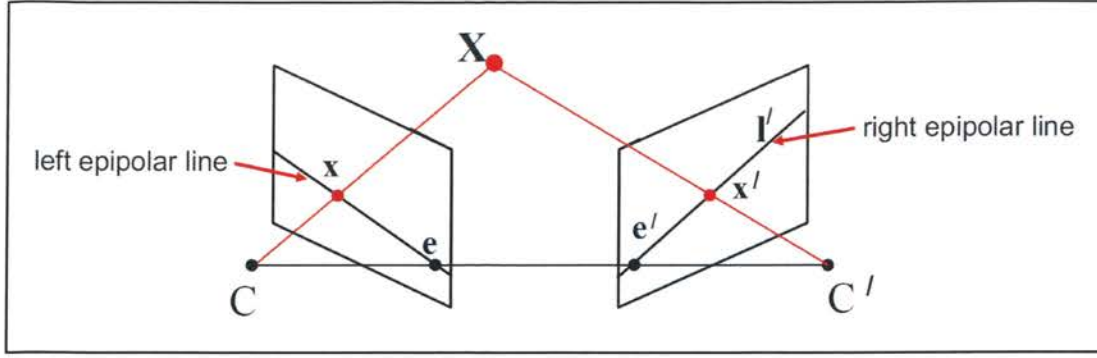
Dış yöneltme, görüntüye ait ışın demetlerinin arazi koordinatları ile ilişkilendirilmesidir (Şekil 3.4.). Bir görüntünün dış yöneltme parametreleri görüntü merkezine ait 3 adet öteleme (X_0, Y_0, Z_0), 3 adet dönüklük (ω, ϕ, κ) olmak kaydıyla

6 parametreden oluşmaktadır. Yani bir stereo görüntü çifti için toplam 12 adet dış yöneltme parametresi (X_{ol} , Y_{ol} , Z_{ol} , ω_l , ϕ_l , κ_l , X_{or} , Y_{or} , Z_{or} , ω_r , ϕ_r , κ_r) bulunmaktadır. Stereo görüntü yöneltmesi karşılıklı ve mutlak yöneltme olarak iki adımdan oluşur. Bu parametrelerden 5 tanesi karşılıklı yöneltme ile, 7 tanesi de mutlak yöneltme ile çözümlenir. Ölçek (λ) parametresi mutlak yöneltmede çözümlenmektedir.

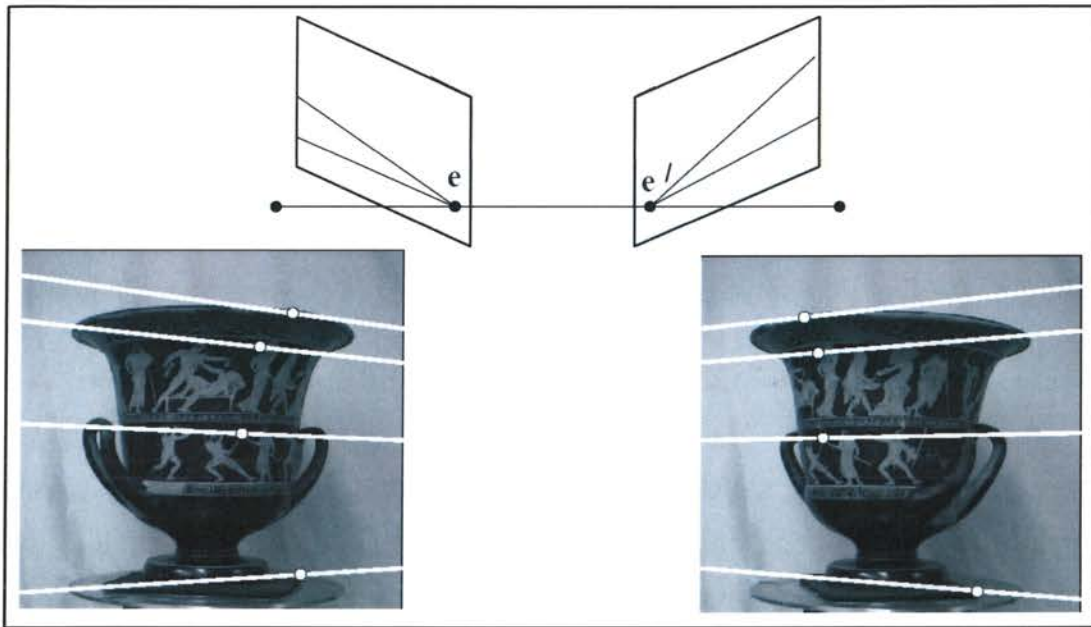


Şekil 3.4. (a) Dış yöneltme öncesi ışın demetleri (b) Dış yöneltme sonrası ışın demetleri (Habib, 2016).

Karşılıklı yöneltme, bir stereo görüntü çiftini birbirleri ile ilişkili olacak şekilde konumlandırarak bu görüntü çiftinde bulunan ışın demetlerinin bir düzlemde kesiştirilmesidir. Karşılıklı yöneltme sonucunda 5 adet eşlenik ışın demeti kesiştirilerek κ_l , κ_r , ϕ_l , ϕ_r ve ω_l parametreleri çözümlenir ve y paralaksı ortadan kaldırılır. Stereo görüntü çifti üzerindeki geri kalan eşlenik ışın demetlerinin tamamının kesiştirilmesi için bu 5 adet eşlenik ışın demetinin kesiştirilmesi yeterlidir. Eşlenik ışın demetleri aynı düzlemde yani düzlemdeş (coplanar) olmak koşuluyla kesişebilirler. Bu koşulların sağlandığı matematik model düzlemdeşlik (coplanarity) olarak adlandırılır. Düzlemdeşlik modelinde bir stereo görüntü çiftine ait kamera izdüşüm merkezi noktaları, görüntü noktaları ve nesne noktası aynı düzlemde bulunurlar. Bu düzleme epipolar düzlem adı verilir (Şekil 3.5, Şekil 3.6). Bezner şekilde, kamera izdüşüm merkezi görüntü ve nesne noktasının aynı doğrultu üzerinde olması kolinearite olarak adlandırılmaktadır. Kolinearite koşullarını matematiksel olarak ifade eden denklemler fotogrametrik hesaplamalarda çokça kullanılmaktadır.

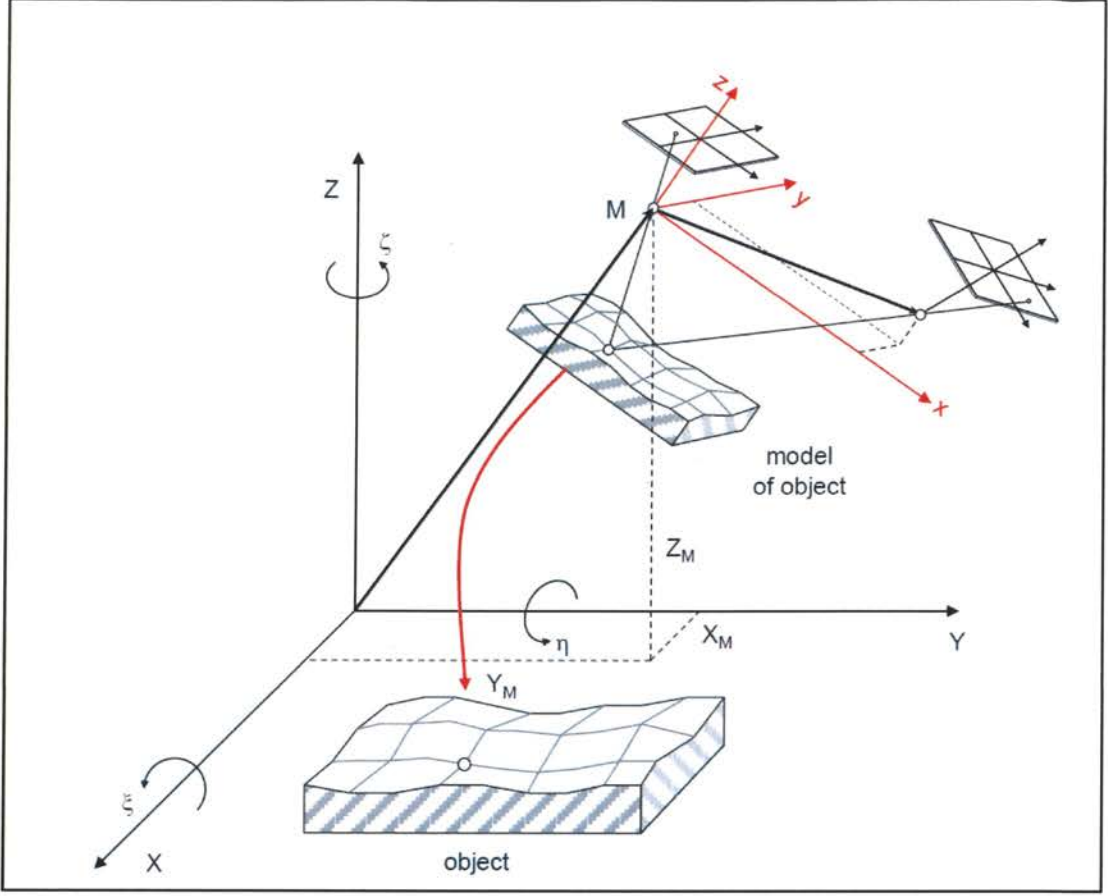


Şekil 3.5. Epipolar geometri gösterimsel çizim (Szeliski, 2010).



Şekil 3.6. Epipolar geometri gösterimsel çizim ve stereo görüntü çifti (Hartley ve Zisserman, 2011'den değiştirilerek).

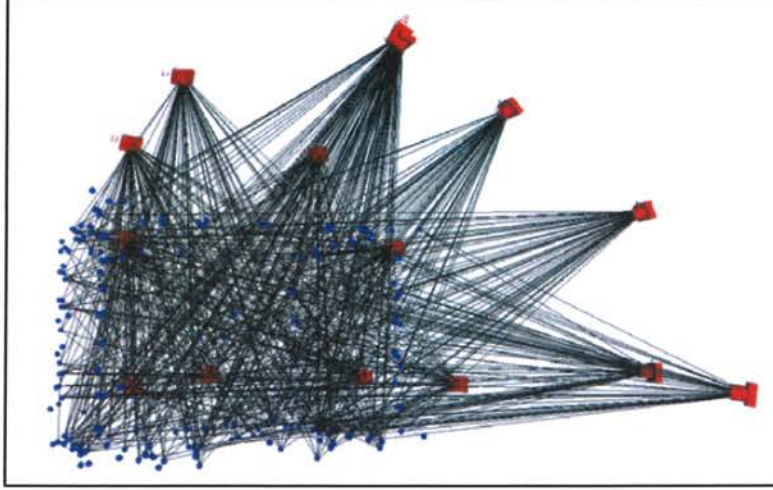
Dış yöneltmenin ikinci adımı olan mutlak yöneltmede, karşılıklı yöneltme ile oluşturulan lokal koordinat sistemindeki model, 3 adet ötelenme (X_0, Y_0, Z_0), 3 adet dönüklük (ω, ϕ, κ) ve 1 adet ölçek (λ) olmak üzere toplam 7 parametrenin çözümlenmesi sonucunca arazi ile ilişkilendirilir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Mutlak yönlendirme (Luhmann ve ark., 2014).

Yukarıda belirtildiği şekilde, dış yönlendirme yapılırken yalnızca bir stereo fotoğraf çifti için 12 adet dış yönlendirme parametresi çözümlenmekte olup, daha fazla sayıda fotoğrafın kullanıldığı stereo modellerde çözümlenecek parametre sayısı da artmaktadır. Onlarca hatta yüzlerce fotoğrafın birlikte kullanıldığı stereo modellerde bu parametrelerin çözümlenmesi oldukça zorlu olacağından, bu durumun üstesinden gelebilmek için bazı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında sıklıkla başvurulardan bir tanesi de ışın demetleriyle blok dengelemedir (bundle block adjustment). Işın demetleriyle blok dengeleme, iç ve dış yönlendirme parametreleri ile görüntü noktalarının istatistiksel bir yaklaşımla optimum olarak hesaplanmasına olanak sağlayan bir yöntemdir (Förstner ve Wrobel, 2016). Yöntem, görüntü üzerindeki bütün noktaların kamera izdüşüm merkezinde toplanan uzaysal bir ışın demeti oluşturduğu ve çok sayıda bindirmeli görüntüye ait bu ışın demetlerinin (Şekil 3.8) hep birlikte bir blok şeklinde

dengelenebileceği temeline dayanmaktadır. Bu nedenle de ışın demetleriyle blok dengeleme olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 3.8. Çoklu görüntülere ait ışın demetleri (Luhmann ve ark., 2014).

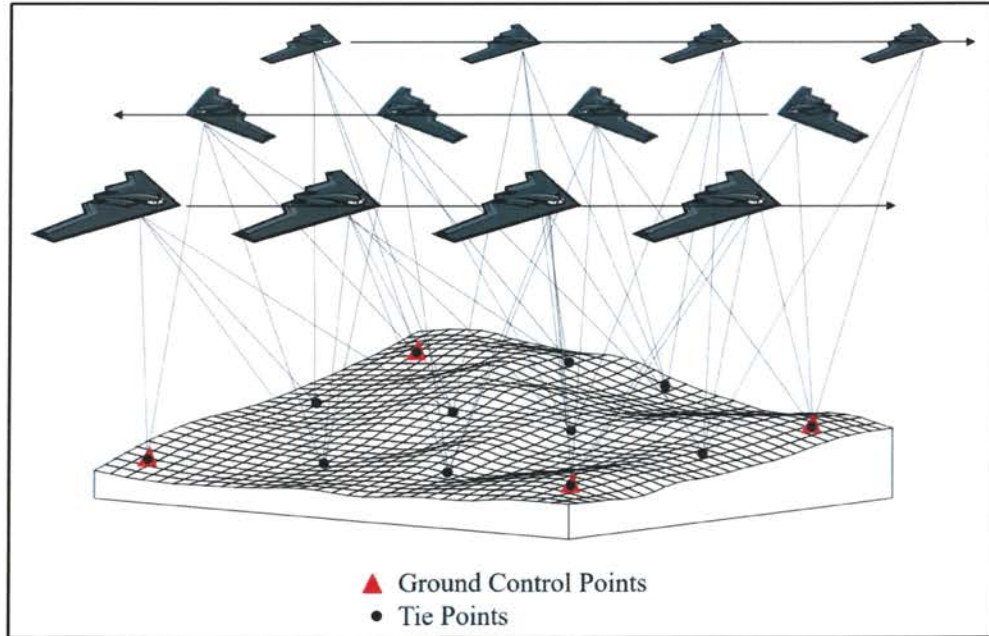
Işın demetleriyle blok dengeleme yönteminde bütün görüntülerin tek bir blok olarak dengelenmesi sebebiyle yüzlerce görüntü söz konusu olsa dahi, çok az sayıda YKN yeterli olabilmektedir (Şekil 3.8). Dengeleme sırasında bağlama noktaları (tie points) ve YKN'lere ait ışınlar, arazi ve görüntü üzerinde kolinearite koşulları kullanılarak eş zamanlı olarak kesiştirilmektedir. Dengelemenin gerçekleşmesi için modele ait bilinen ve bilinmeyen parametrelerin matematiksel ilişkisi doğrusallaştırılarak en küçük kareler yöntemi uygulanır. Bindirmeli fotoğraflardan oluşturulmuş bir modele ait bilinmeyen parametreler; her fotoğrafa ait 6 adet dış yöneltme parametresi ile bağlama noktalarının nesne uzayındaki coğrafi koordinatlarıdır. Bilinen parametreler ise bağlama noktalarının resim koordinatları ile YKN'lerin bir referans koordinat sisteminde tanımlanan nesne uzayındaki coğrafi 3B koordinatlarıdır. Buradan hareketle bilinen ve bilinmeyen sayısı aşağıdaki şekilde formüleleştirilebilir.

$$\text{Bilinmeyen parametre sayısı: } 6n_r + 3n$$

$$\text{Bilinen parametre sayısı: } 3k + (2 \times n_i)$$

k : YKN sayısı n : Toplam nokta sayısı n_i : Noktaların görüntü ölçümü sayısı

Burada, her bir bağlama noktasının en az iki görüntüde ölçülmüş olması koşulu vardır. Işın demetleriyle blok dengelemesinin matematiksel olarak gerçekleştirilebilmesi için, en küçük karelerle kestirim yönteminin de ön koşulu olan, bilinen parametre sayısının bilinmeyen parametre sayısından fazla olması gerekmektedir (serbestlik derecesi ≥ 0). Bu sebeple YKN ve resim bağlama noktalarının sayısı (bir diğer deyişle de bindirme oranı) matematiksel modelin kurulabilmesi ve model hassasiyeti için önem taşımaktadır. Diğer yandan, komşu görüntülerin bindirme oranı da model hassasiyeti açısından oldukça önemlidir. Ayrıca, ışın demetleri ile dengeleme modeline kamera parametreleri de bilinmeyen olarak eklenebilir ve bu şekilde self-kalibrasyon yöntemi uygulanarak kamere iç yöneltme elemanlarının 3B nokta koordinatları ile eş zamanlı kestirilmesi sağlanabilir (Kocaman, 2008). Işın demetleriyle blok dengeleme aynı zamanda SfM fotogrametrisini oluşturan işlem basamaklarından biridir. Kamera dış yöneltme parametrelerinin pozisyon kestirimlerinin hassaslaştırılmasına iç yöneltme parametreleri ile birlikte kestirilmesine imkan vermesi sebebiyle SfM fotogrametrisinin hassas ve verimli kullanımına önemli katkı sağlamıştır (Zhang ve ark., 2006).

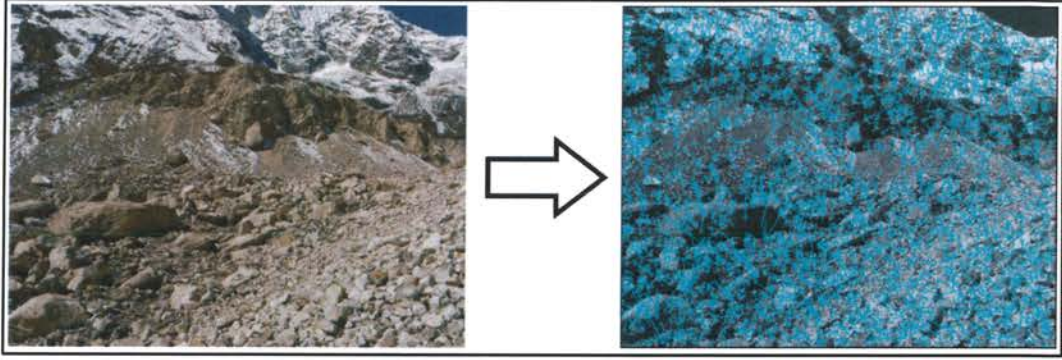


Şekil 3.9. YKN, bağlama noktaları ve ışın desteleri (Habib, 2018).

1980'lerin sonu, bir dizi karşılıklı öznitelik benzerliği yardımıyla kamera konum ve yönelimlerini aynı anda çözümleyip 3 boyutlu model oluşturabilen hareketten nesne oluşturma SfM fotogrametrisinin gelişimine sahne oldu (Snavely ve ark., 2007). Son 10 yıl içerisinde SfM fotogrametrisi metrik hassasiyet kaygısı gütmeksizin sınırsız sayıda görüntünün otomatik modellenmesini mümkün kılması sebebiyle, bilgisayarlı görü (computer vision) alanında diğer yöntemlerden ayrı bir yere oturmuştur (Bemis ve ark., 2014). Yöntemde stereoskopik fotogrametri prensiplerinde olduğu gibi 3 boyutlu model, bindirmeli görüntü serilerinin çözümlenmesi ile elde edilir. Tipik bir SfM fotogrametrisi akışında ilk adım görüntülerde yer alan ayırt edici anahtar noktaların (keypoint) tespit edilmesi ve eşlenmesidir. En az iki görüntüde ölçülen anahtar noktaları ışın demeti dengelemesinde bağlama noktası olarak kullanılmaktadır. Sonrasında kullanılan blok dengeleme algoritmaları, anahtar noktalarının 3 boyuttaki konumları ile kameranın konum/dönüklük ve iç yöneltme parametrelerini optimize ederek, 3 boyutlu modelin oluşturulmasına olanak sağlar (Favalli ve ark., 2011). Bu açıdan, self-kalibrasyon ile SfM fotogrametri yöntemleri benzeşmektedir. Temel fark, SfM yönteminde temel hedefin 3B nokta koordinatlarının doğruluğu iken self-kalibrasyon yönteminde kamera iç yöneltme parametrelerinin de doğru olarak kestirimin hedeflenmesidir.

Ayırt edici anahtar noktalarının otomatik tespiti ve ölçümü için pek çok yöntem bulunmakla birlikte (Snavely ve ark., 2007), görüntü ölçek, dönüklük, perspektif ve ışık farklarına bağışık olan SIFT [Scale Invariant Feature Transform (Lowe, 2004)] algoritması yaygın olarak kullanılmaktadır (Clayput ve ark., 2016). SIFT algoritması kullanılan tipik bir yakın çekim görüntüde binlerce anahtar nokta tespit edilebilir (Snavely ve ark., 2007). Bu kullanım, klasik dijital fotogrametride kullanılan alan tabanlı görüntü eşleştirme yöntemlerine kıyasla SfM fotogrametrisinin önemli avantajlarından biridir. Alan tabanlı yaklaşımlar, iki farklı görüntüye ait piksel parçalarının genellikle basit bir görüntü konvolüsyon operatörü ile hesaplanan çapraz korelasyonuna dayanır. Çapraz korelasyon yöntemi görüntü çözünürlük farklarından fazlasıyla etkilenmektedir. SIFT ise, anahtar noktaları çok ölçekli parlaklık ve renk değişim gradyanlarını esas olarak tanımlamaktadır. Çoklu ölçek kullanımı ile SIFT, farklı çözünürlükteki

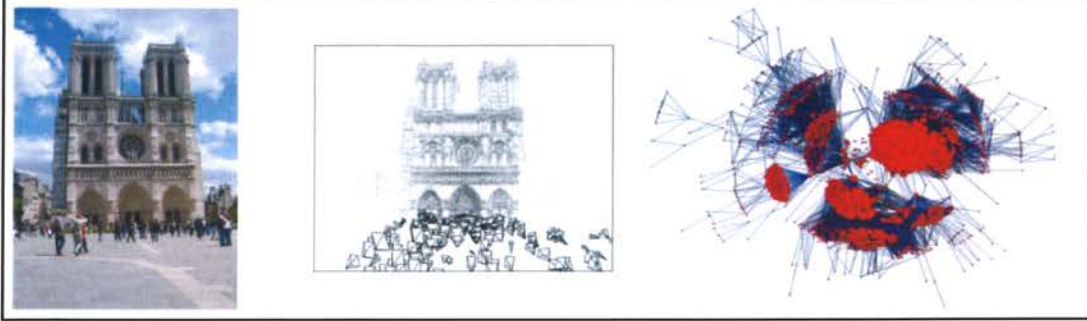
görüntülerdeki anahtar noktaların tespit edilme sorununu ortadan kaldırmaktadır. Dahası, mutlak piksel değerleri yerine renk değişim gradyanlarının kullanılması bir nesne ile arka planı arasındaki renk değişiminden faydalanarak o nesneyi birden fazla bakış açısından tanımlanabilir kılmaktadır (Fonstad ve ark., 2012). SIFT algoritması anahtar noktaların yoğunlaştığı lokal bölgeleri öznitelik vektörleri ile tanımlar (Şekil 3.10.) (Jiang ve ark., 2020). Sonraki adım farklı görüntülerde tespit edilen anahtar noktaların eşleştirilmesidir.



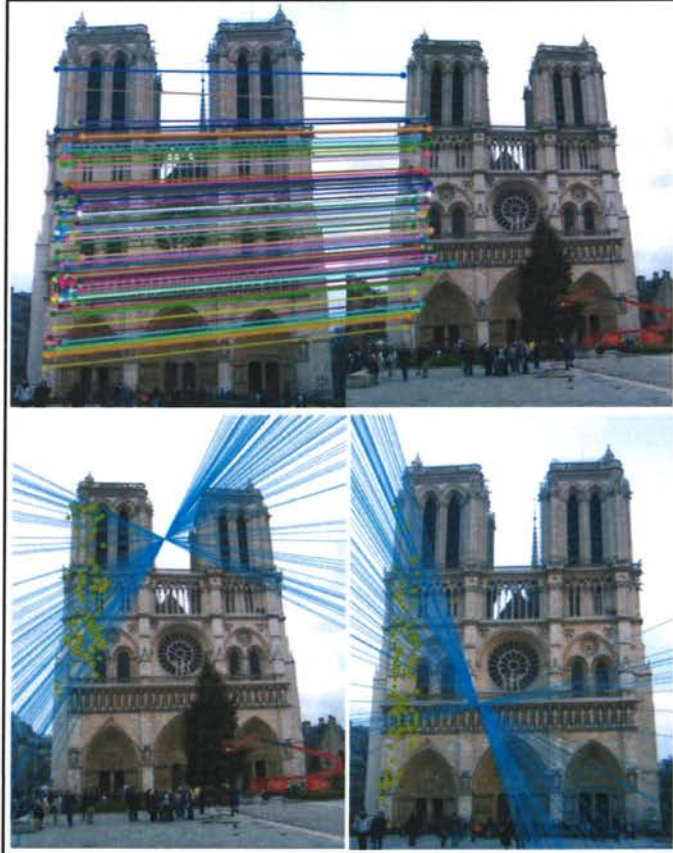
Şekil 3.10. SIFT algoritması verilen görüntüyü bir anahtar nokta veritabanı haline getirmektedir. Çizgiler anahtar nokta bulunduran alanların (pikseller) yarıçaplarını temsil etmektedir (Westoby ve ark., 2012'den değiştirilerek).

Anahtar noktalar belirlendikten sonra, farklı görüntülerdeki eş anahtar noktalarının belirlenmesi gerekmektedir. Herhangi bir görüntüde tespit edilen bir anahtar noktanın başka bir görüntüde eşleniği olmayabileceği için, eşleniği olmayan anahtar noktaların elenmesi gerekmektedir (Carrivick ve ark., 2016). Anahtar noktaların eşleştirilmesi iki öznitelik vektörü arasındaki en küçük öklid mesafesine sahip en yakın komşu problemi olarak ele alınır (Jiang ve ark., 2020). Görüntü çiftleri arasındaki anahtar noktalar eşleştirildikten sonra RANSAC (Fischler ve Bolles, 1981) algoritması kullanılarak bu görüntü çiftlerine ait temel matris kestirimi yapılır ve işlemin diğer görüntü çiftlerine de uygulanması sonucunda bütün genel bağlantısallık grafikleri elde edilir (Şekil 3.11.) (Snavely ve ark., 2007). Görüntü çiftleri arasındaki eşlemeler kendi içerisinde ışın yollarına (track) ayrılırlar. Bir yolun oluşabilmesi için 3 görüntüde yer alan en az 2 anahtar nokta gereklidir. Oluşturulan bir yol, görüntüde yer alan aynı anahtar nokta ile iki

kez eşleştiriliyor ise geçersiz kabul edilir (Carrivick ve ark., 2016). Anahtar nokta eşleştirmeleri ve oluşturulan yollara bir örnek çalışma Şekil 3.12.'de verilmiştir.



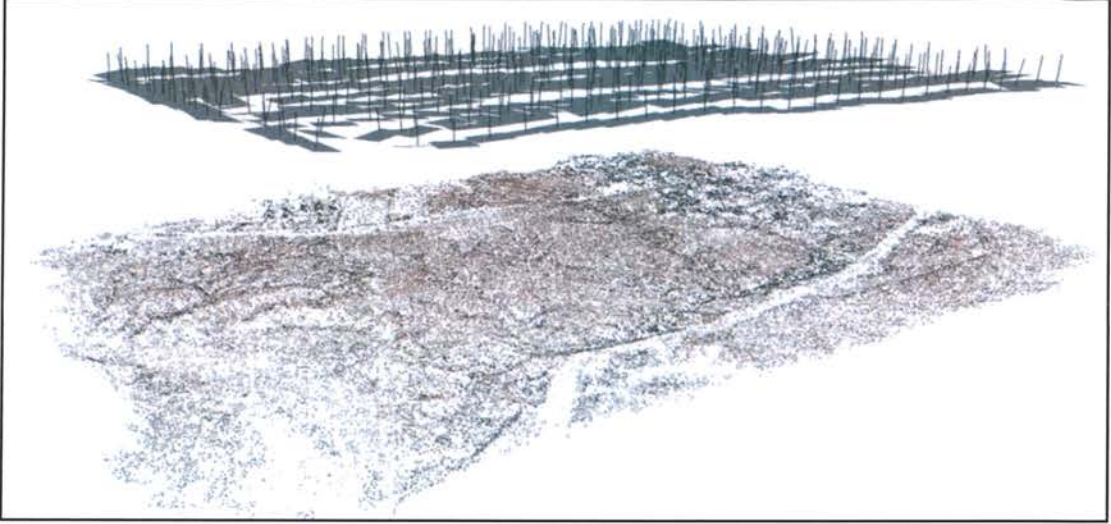
Şekil 3.11. Notre Dame'a ait görüntülerle oluşturulan bağlantısallık grafiği (Snavely ve ark., 2007'den değiştirilerek).



Şekil 3.12. Anahtar nokta eşleştirme (Habib, 2018'den değiştirilerek).

SfM fotogrametrisinde eşdoğrusallık denklemleri rastgele tanımlanmış bir koordinat sistemi üzerinde model uzayında çözümlenir. Buna ek olarak eşleştirilen çok sayıdaki anahtar nokta sayesinde kamera kalibrasyonlarının

yapılması da mümkün olabilmektedir (Fonstad ve ark., 2012). SfM fotogrametrisine ait gerçekleştirilen bu işlemler sonucunda elde edilen veriler; gelişigüzel bir koordinat sistemi üzerinde ölçeklendirilmiş seyrek nokta bulutu (sparse point cloud), görüntülerin model uzayı konumu ve dönüklükleri ve kameralara ait kalibrasyon parametreleridir (Şekil 3.13.).



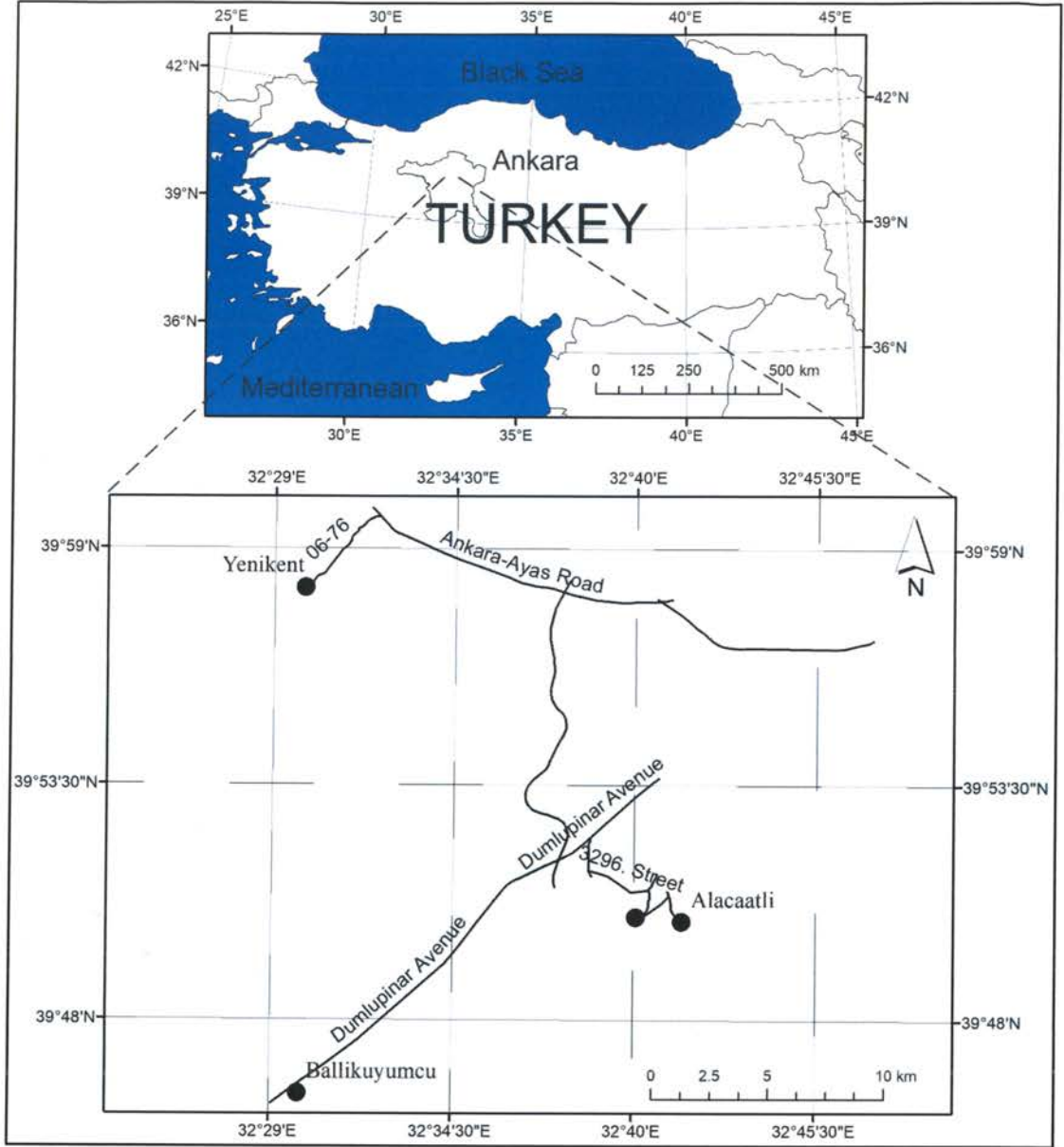
Şekil 3.13. 370 adet hava fotoğrafı ile oluşturulmuş gevşek nokta bulutu verisi ve bu fotoğraflara ait konumlar (Aber ve ark., 2019'dan değiştirilerek).

SfM fotogrametrisi adımları sonunda gelişigüzel bir koordinat sisteminde oluşturulan seyrek nokta bulutu verisine ilişkin mutlak yöneltme işlemi için minimum 3 adet 3B YKN gerekmektedir. Bu YKN'lerin her biri ile 3 adet öteleme (X_0, Y_0, Z_0), 3 adet dönüklük (ω, ϕ, κ) ve 1 adet ölçek (λ) olmak üzere toplam 7 parametre çözümlenerek, seyrek nokta bulutu verisi arazi ile ilişkilendirilir.

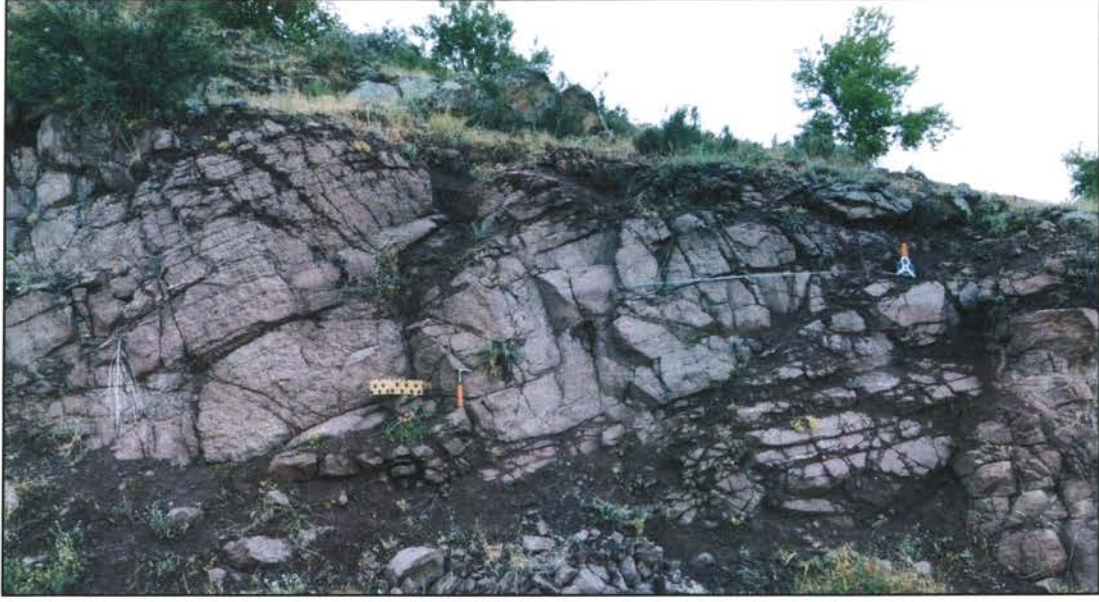
4. ARAZİ ÇALIŞMALARI

4.2. Çalışılan Sahaların Genel Özellikleri

Saha çalışmaları Ankara İli içerisinde 3 farklı lokasyonda yapılmıştır (Şekil 4.1). Bu lokasyonlardan ilki şehir merkezinin yaklaşık 35 km batısında yer alan Yenikent Zir Vadisidir. Bölgede Tekke Volkanitleri olarak adlandırılan Üst Miyosen yaşlı andezit, tüf ve aglomeradan oluşan volkanik birimler gözlemlenmektedir (Akyürek ve ark., 1997; Seyitoğlu ve Büyükonal, 1995). Saha çalışmaları, eski bir taş ocağında yer alan 5 farklı andezit kaya kütlesi üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.2). Andezitler genel olarak kırmızımsı pembe renkte, soğuma çatlakları içeren ve eski taş ocağı olması sebebiyle yer yer örselenmiş yapıdadır. Saha çalışmalarının yapıldığı bir diğer lokasyon da şehir merkezinin yaklaşık 26 km güney batısında yer alan Alacaatlı mevkiidir. Bu lokasyondaki saha çalışmaları yol yarması olarak gözlemlenen 3 farklı kireçtaşı kaya kütlesi üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.3). Bu kireçtaşı kütleleri Jura yaşlı Akbayır Formasyonu içerisinde yer almaktadır (Akyürek ve ark., 1997; Bilgutay, 1960). Genel olarak krem renkte olup, silis bantları ile çört yumruları içermektedirler. Tabakalı yapı içerisinde yer yer marn seviyeleri de gözlemlenmiştir. Saha çalışması yapılan son lokasyon şehir merkezinin yaklaşık 45 km güney batısında yer alan Ballıkuyumcu mevkiindeki Kargabedir Tepesi'dir. Bu lokasyonda 2 farklı trakeandezit kaya kütlesi üzerinde hat etüdü çalışması yürütülmüştür (Şekil 4.4). Çalışmanın yapıldığı trakeandezitler Üst Miyosen yaşlı Tekke volkanitlerinin, magmatik diskordans ile dayk yaparak Kargabedir Tepesi'nde yüzeylemesi sonucunda oluşmuştur (Akyürek ve ark., 1997; Varol ve ark., 2007). Genellikle koyu gri renkte gözlemlenmekte olup, sokulum sonucunda atmosfer ile temas ederek ani soğumaya maruz kalması sebebiyle çok sayıda soğuma çatlakları bulunmaktadır.



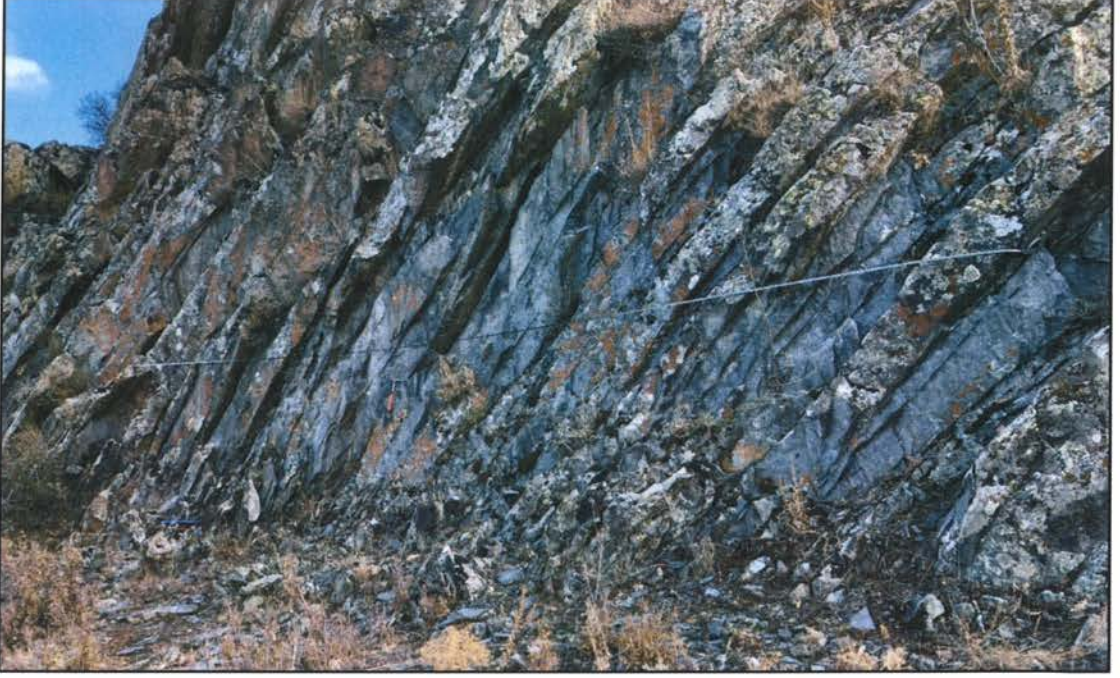
Şekil 4.1. Yer bulduru haritası.



Şekil 4.2. Çalışma yapılan andezit türü kaya kütlesi (Yenikent 5. Lokasyon).



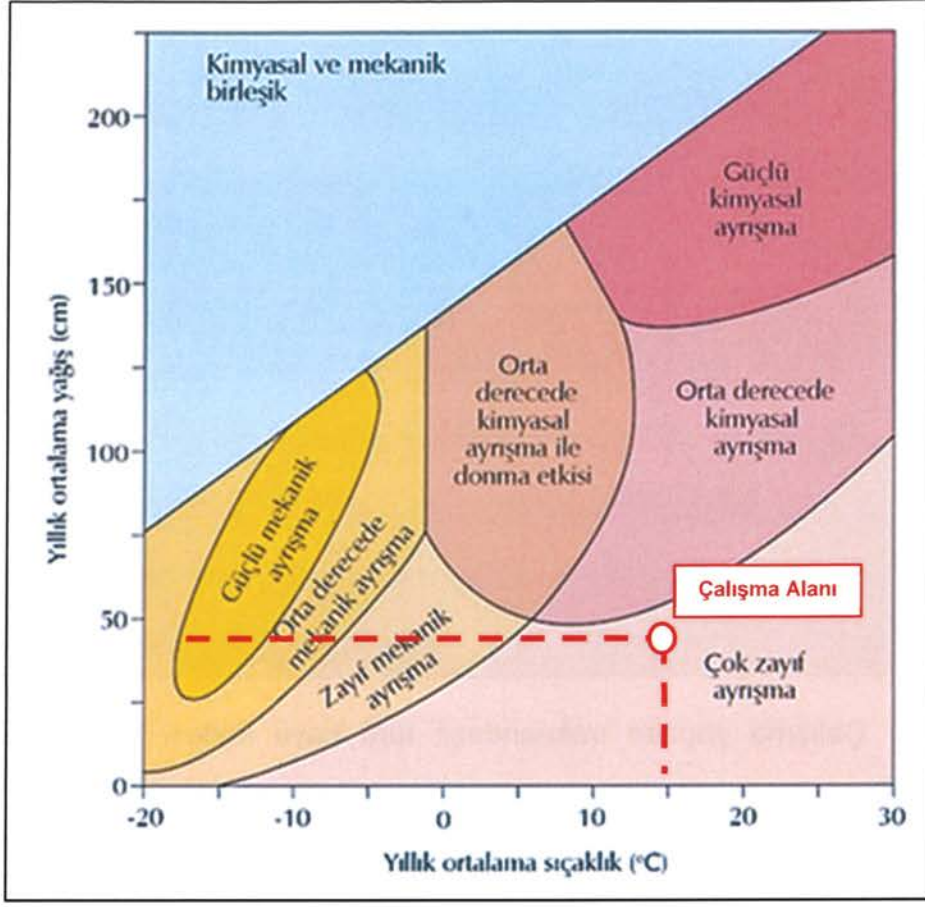
Şekil 4.3. Çalışma yapılan kireçtaşı türü kaya kütlesi (Alacaatlı 2. Lokasyon).



Şekil 4.4. Çalışma yapılan trakeandezit türü kaya kütlesi (Ballıkuyumcu 1. Lokasyon).

4.3. Meteorolojik Özellikler

Meteoroloji Genel Müdürlüğü uzun dönem verileri itibariyle Ankara'nın yıllık ortalama sıcaklığı 11.9 °C olup, aylık ortalama sıcaklıkları -3.3 °C (Ocak) ile 30.4°C (Ağustos) arasında değişmektedir. Senelik yağışlı gün sayısı yaklaşık olarak 134 gün, ortalama yağış miktarı ise 393.2 mm'dir. Bu yağış ve sıcaklık verileri dikkate alındığında Çalışma yapılan kaya kütleleri için Peltier (1950)'ye göre çok zayıf kimyasal ve mekanik ayrışma beklenmektedir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Kimyasal ve mekanik ayrışma seviyeleri (İstanbul Üniversitesi Açık ve Uzaktan Eğitim Fakültesi Fiziki Coğrafya Ders Notları; Peltier 1950'den değiştirilerek).

4.4. Genel Jeoloji

Ankara ili içerisindeki havzalar Orta Anadolu havzaları olup, Kretase – Eosen döneminde Anadolitler'de yer alan Kırşehir Bloğu ve Sakarya Kitası'nın birbirlerine yaklaşmaları ile ortaya çıkmıştır (Şengör ve Yılmaz 1981; Görür ve ark., 1984). Bu bölge değişik jeolojik özelliklere sahip olan kayalardan meydana gelmektedir. Permian zamanında en yaşlı birimler karbonat platformu durumunda iken Permian sonu Triyas dönemi aralığında parçalanarak Karakaya Denizi'ne dönüşmüştür. Bu deniz uzun, derin olması ile birlikte kısa ömürlü ve dardır. Sakarya Kitası'nın temeli, Triyas dönemi sonunda Karakaya Denizi'nin kapanması ve kalıntılarının metamorfizma geçirmesiyle meydana gelmiştir (Tüysüz ve Dellaloğlu, 1992). Araştırmacılar tarafından Karakaya Kompleksi

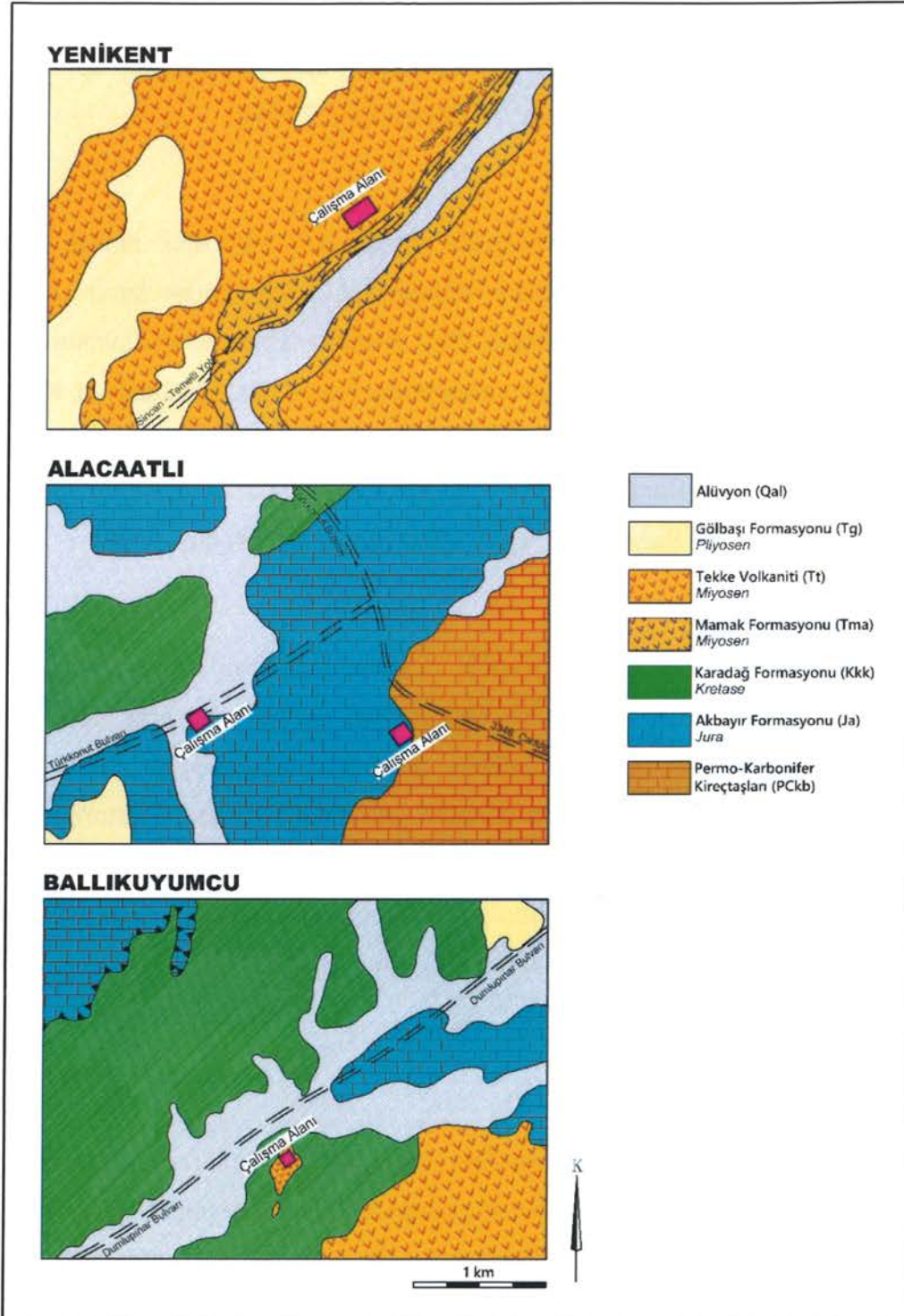
olarak adlandırılan bu temel şiddetlice deforme olmuş ve Permiyen- Triyas yaşındaki kısmen metamorfizmaya uğramış klastikler ile birlikte volkanik istiflerden meydana gelmiştir (Okay ve Göncüoğlu, 2004).

Liyas – Üst Kretase döneminde bölgede genişlemeli rejim etkili olmuş, Kırşehir Bloğu ve Sakarya Kıtası arasındaki riftleşmeye bağlı olarak İzmir – Ankara Okyanusu meydana gelmiştir. Bölge Geç Kretase zamanında sıkıştırılmalı bir rejimin etkisinde kalmış ve bunun sonucunda Neo-Tetis' in Sakarya Kıtası ile Kırşehir Bloğu arasındaki kuzey kolu tüketilmeye başlamıştır (Şengör ve Yılmaz, 1981). Bu dönemde Karakaya Birliği'ne ait ana kayaların üzerinde gelişimine başlayan platform ise Sakarya Birliği'dir (Tüysüz ve Dellaloğlu, 1992).

Paleosen sırasında önemli bir granitik magma sokulumu meydana gelmiştir. Eosen boyunca karasallaşma harekete geçmiş ve hem karasal hem denizel kesimlerde kayaç oluşumları meydana gelmiştir. Oligosen'de ise evoporitik göllerde bulunan jipsler tarafından çökeltim gerçekleştirilmiştir. Tektonik etkilerin önemli volkanizma hareketlerini tetiklemiş olduğu Miyosen sırasında, meydana gelen andezit, tuf ve aglomeralar geniş alanları doldurmuşlardır. Volkanik aktivite Pliyosen dönemi sonlarında durmuştur (Akyürek ve ark., 1997).

4.4.1. Stratigrafi

Çalışma sahaları ve yakın civarındaki stratigrafik birimlerin araştırılmasında Akyürek ve ark. (1997) tarafından hazırlanan 1/100.000 ölçekli MTA I29 Ankara paftası jeoloji haritasından faydalanılmıştır. Bu çalışma doğrultusunda çalışma sahaları ve yakın çevresindeki jeolojik birimleri gösterir harita Şekil 4.7'da sunulmuş olup, birimlere ait stratigrafik açıklamalar aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.6. Çalışma alanları ve çevresini gösteren jeoloji haritası (Akyürek ve ark., 1997'den değiştirilerek).

4.4.1.1. Permo-Karbonifer Yaşlı Kireçtaşı (PCkb)

Ankara Grubu'nu oluşturan formasyonlardan biri olan Elmadağ Formasyonu, içerisindeki fosil mevcudiyetine istinaden ayırt edilebilmiş kireçtaşı blokları olarak tanımlanabilir. Mostra verdiği muhtelif kısımlarda Karbonifer ve Permiyen yaşlarının her ikisini de yansıtan fosil birikimleri bulunmuş olup gri, beyaz, bej ve krem renkli, yer yer kristalize ve çatlaklı bir görünüm sunmaktadır (Akyürek ve ark., 1997).

4.4.1.2. Akbayır Formasyonu (Ja)

Genellikle kremi beyaz, bej ve bazı kesimlerde kırmızı renkli, ince – orta tabakalı, çörtlü, hemipelajik biyomitrik kireçtaşları ile karakterize edilen Üst Jura – Alt Kretase yaşlı bu birimin ilk incelenmesi Akyürek ve ark. (1984) tarafından Akbayır Formasyonu olarak gerçekleştirilmiştir. Alacaatlı bölgesinde türbiditik kalkarenit ara düzeyleri de bulunmaktadır (Akyürek ve ark., 1997).

4.4.1.3. Karadağ Formasyonu (Kkk)

Kılıçlar Grubu içerisinde yer alan birimin ilk adlandırılması Akyürek ve ark. (1984) tarafından gerçekleştirilmiştir. Karadağ Formasyonu en altta volkanik tane içerikli kumtaşı – çakıltası aralanmaları ile başlar. Üste kesimlerde ise kumtaşı – çamurtaşı aralanması biçiminde devam ederken pelajik killi kireçtaşı düzeyleri artar. Bunun sonucunda bütünüyle killi kireçtaşına geçiş yapar (Akyürek ve ark., 1984). Fosil topluluğuna göre birimin yaşı Senomaniyen – Kampaniyen (Üst Kretase) olarak belirlenmiştir (Akyürek ve ark., 1997).

4.4.1.4. Mamak Formasyonu (Tma)

Mamak Formasyonu yaygın volkanizmanın gözlemlendiği bölgelerde tuf, andezit, tuf, aglomera ve bazalt bileşimindeki lavlardan meydana gelmektedir. Mamak Formasyonu girişik olduğu diğer formasyonlarla aynı yaşta kabul edilerek Üst Miyosen olarak yaşlandırılmaktadır. (Akyürek ve ark., 1997).

4.4.1.5. Tekke Volkanitleri (Tt)

Andezit, tuf, trakiandezit, aglomera, bazalt ve dasitten oluşan birim ilk kez Akyürek ve ark. (1984) tarafından adlandırılmıştır. Birbirinden farklı evrelerde oluşmuş bu birim Üst Miyosen yaşta kabul edilmektedir (Akyürek ve ark., 1997). Bölgedeki Miyosen dönemine ait karasal koşulların hakim olduğu sırada oluşan volkanizmanın ürünleri tarafından bu birim oluşturulmuştur. Birimin yanal yöndeki yayılımlarında andezit, trakiandezit ve bazalt gibi farklı mineralojik bileşendeki geçişler kolaylıkla gözlemlenebilir (Akyürek ve ark., 1997).

4.4.1.6. Gölbaşı Formasyonu (Tg)

İlk adlandırılması Akyürek ve ark. (1982) tarafından gerçekleştirilen bu birim, gri, kırmızımsı renkte, gevşek şekilde tutturulmuş farklı boy ve kökene sahip konglomera, kumtaşı ve çamurtaşından oluşmaktadır. Yanal devamlılık söz konusu olduğunda bu formasyonunu oluşturan kaya türlerinde farklılaşmalar gözlemlenebilir. Stratigrafideki yeri ve eski çalışmalara istinaden birimin yaşı Pliyosen olarak kabul edilebilir (Akyürek ve ark., 1997).

4.4.1.7. Alüvyon (Qal)

Bölgedeki en güncel formasyon olan bu birim, nehir yataklarında depolanan tutturulmamış veya gevşek olarak tutturulmuş, kum, silt ve çakıllardan oluşmaktadır.

4.5. Hat Etütleri (Scan-line Surveys)

Hat etüdü yöntemi kaya kütlesi ve süreksizlik karakterizasyonu için uygulanan başlıca yöntemlerden birisidir. Tez kapsamında farklı kaya kütleleri üzerinde toplamda 10 adet hat etüdü çalışması yapılmış olup, her bir kaya kütlesi ayrı hat etüdü çalışması ile araştırılmıştır. Hat etüdü çalışmaları temel olarak şerit metrenin kaya mostrası yüzeyine konumlandırılması ve şerit metre ile kesilen süreksizlik özelliklerinin belirlenmesi prensibine dayanır (Şekil 4.7a). Bu temel doğrultusunda tez kapsamında 10 farklı kaya mostrasında toplam 75 m hat etüdü

çalışması yapılarak 164 adet süreksizliğin karakterizasyonu yapılmıştır (Çizelge 4.1). Süreksizlik karakterizasyonu kapsamında; yönelim, aralık, devamlılık, pürüzlülük, ayrışma, açıklık, süreksizlik dolgusu ve dalgalılık özellikleri ISRM (2007)'ye göre ölçülmüştür. Süreksizlik yönelimleri Brunton pusulası kullanılarak, süreksizlik yönelimini temsil eden ideal yüzeylerden ölçülmüştür (Şekil 4.7b). Kapalı süreksizlik koşulları ya da fay zonları gibi ideal süreksizlik yüzeylerinin tespit edilemediği durumlarda ise anketör dosyası ya da harita tablası gibi düzlemsel bir cisim yardımıyla yapay süreksizlik yüzeyleri oluşturulmuş olup, bu yüzeylerin yönelim değerleri ölçülmüştür (Şekil 4.7c). Pürüzlülük ölçümleri için ise 15 cm uzunluğunda profilometre kullanılmıştır (Şekil 4.7d).



Şekil 4.7. Hat etüdü (a), brunton pusulası ile tabaka ölçümü (b), yapay süreksizlik yüzeyinden yönelim ölçümü (c), profilometre ile pürüzlülük ölçümü (d).

Çizelge 4.1. Hat etüdü çalışmaları özet tablosu.

Lokasyon	Lokasyon Kodu	Litoloji	Hat Etüdü Uzunluğu (cm)	Ölçülen Süreksizlik (Adet)
Yenikent	YK-Loc1	Andezit	492	13
Yenikent	YK-Loc2	Andezit	463	14
Yenikent	YK-Loc3	Andezit	503	11

Çizelge 4.1. (Devamı) Hat etüdü çalışmaları özet tablosu.

Lokasyon	Lokasyon Kodu	Litoloji	Hat Etüdü Uzunluğu (cm)	Ölçülen Süreksizlik (Adet)
Yenikent	YK-Loc4	Andezit	576	9
Yenikent	YK-Loc5	Andezit	1130	24
Alacaatlı	AA-Loc1	Kireçtaşı	790	17
Alacaatlı	AA-Loc2	Kireçtaşı	720	8
Alacaatlı	AA-Loc3	Kireçtaşı	1280	19
Ballıkuyumcu	BK-Loc1	Trakeandezit	930	37
Ballıkuyumcu	BK-Loc2	Trakeandezit	520	12

4.6. Fotogrametrik Ölçümler

Akıllı telefonlar artan işlem kapasiteleri sayesinde günümüzde birçok fotogrametrik amaç için kullanılabilir seviyeye ulaşmışlardır. Akıllı telefon kameraları, metrik ve DSLR (Digital Single-Lens Reflex) kameralara kıyasla kısa odak uzunluğu, küçük sensör boyutu ve düşük ISO (International Organization for Standardization) aralıkları gibi dezavantajlarına sahip olmasına rağmen makul miktardaki piksel sayıları (>5 MPix) sayesinde bu dezavantajları telafi edebilmektedirler (Jaud et al., 2019). Maliyet ve kullanım kolaylığı da göz önüne alınarak, bu çalışma kapsamındaki fotogrametrik uygulamalarda yer alan görüntüler için Apple Inc. tarafından üretilen iPhone X model akıllı telefon kullanılmıştır (Çizelge 4.2).

Günümüzde sıklıkla kullanılan güçlü görüntü eşleştirme algoritmalarının tartışılmaz faydalarından biri de temel fotogrametrik yaklaşımlar konusunda sağladıkları kolaylıklardır. Bu algoritmalar sayesinde fotogrametrik uygulamalarda ihtiyaç duyulan görüntü bindirmesi ve stereo görüntü çiftleri, kameralar belirli bir geometrik kurala göre konumlandırılmaksızın elde edilebilmektedir. Doğal olarak tripod, slider ve gimball gibi kamera sabitleyici ekipmanlara duyulan ihtiyaç da ortadan kalkmaktadır. Buradan hareketle,

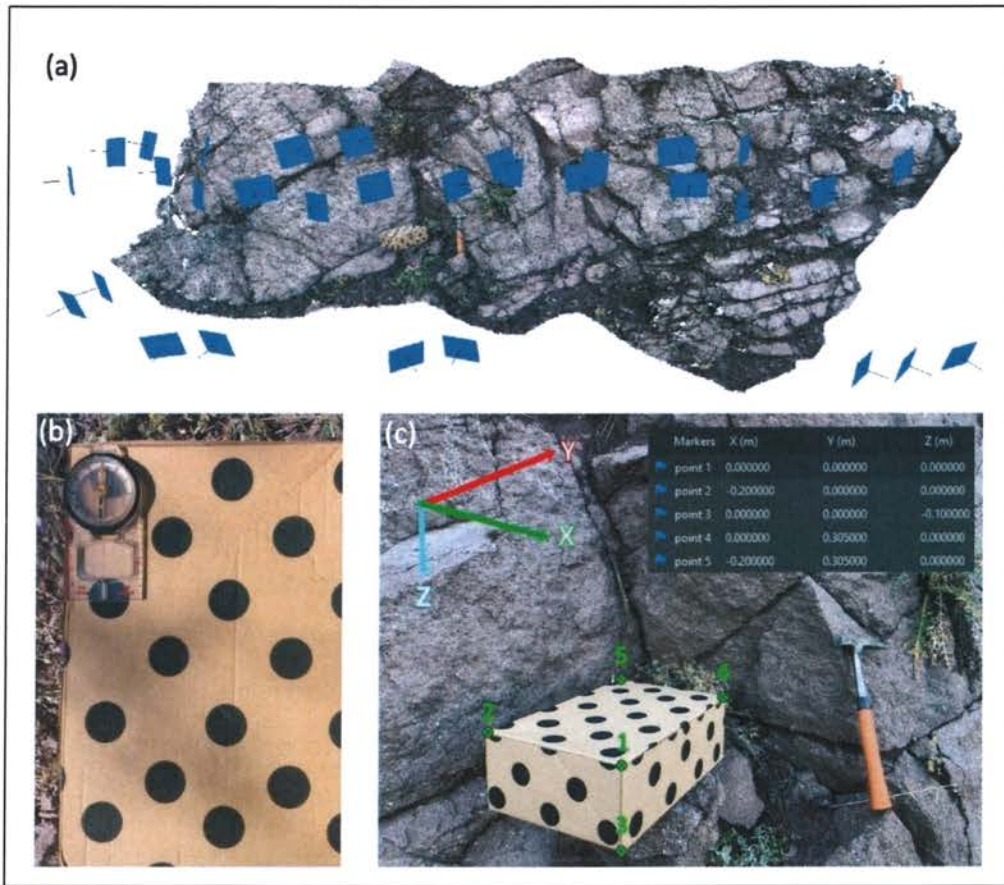
çalışma kapsamında kullanılan görüntüler elde edilirken standart bir görüntü elde etme şablonu kullanılmamış olup kamera konumlarını gösteren temsili bir örnek Şekil 4.8a'da verilmiştir.

Çizelge 4.2. Görüntü alımında kullanılan kamera özellikleri.

Odak uzunluğu (mm)	4
35 mm eşdeğerindeki odak uzunluğu (mm)	28
Görüntü boyutu (piksel)	3024 x 4032 (12 MPix)
Sensör boyutu ve tipi	CMOS, 1/3"
Sensör üzerindeki piksel boyutu (μm)	1.22

Akıllı telefonlar ile görüntü elde etmek ve bu görüntüleri çeşitli algoritmalarla 3D model oluşturmak için kullanabilmek az maliyetli ve kullanışlı gözükse de, süreksizlik yönelimlerinin ölçülmesi söz konusu olduğunda bir başka gereksinim daha söz konusu olmaktadır. Bu gereksinim, oluşturulan 3D modellerin jeoreferanslama (mutlak yöneltme) işlemidir. Jeoreferanslamanın amacı, oluşturulan 3D modelin gerçek durumda uzayda var olduğu şekildeki konum, ölçek ve dönüklük koşullarının sağlanmasıdır. Bu işlem yapılmadığı takdirde, modelde ölçülen süreksizlik yönelimleri gelişigüzel şekilde oluşturulmuş bir koordinat sistemine ait olacağı için saha koşullarını yansıtmayan göreceli sonuçlar elde edilecektir. Jeoreferanslama taşıdığı bu önemin yanı sıra, saha koşulları itibariyle çok pratik olmayan, zaman alıcı ve maliyetli bir uygulamadır. Referans için ihtiyaç duyulan harici yer kontrol noktalarının (YKN) elde edilebilmesi için total station ya da GNSS (Global Navigation Satellite System) gibi enstrümanların kullanılması gerekmektedir. Süreksizlik etütleri ve saha koşulları söz konusu olduğunda bu enstrümanların taşınması, kullanılması ve korunması kaçınılmaz şekilde ekstra zaman, maliyet ve iş gücü ihtiyacı doğurmaktadır. Söz konusu dezavantajlardan etkilenmeksizin, pratik ve maliyetsiz bir çözüm üretebilmek adına bu tez çalışmasında bahsi geçen jeoreferanslama ekipmanlarına ihtiyaç duyulmayan bir çözüm uygulanmıştır. Bu çözüm kapsamında kullanılan ekipman 30,5 cm x 20 cm x 10 cm boyutunda prizmatik

karton bir kutudur. Bu kutu, uzun kenarı coğrafi kuzey ile paralel olacak şekilde süreksizlik etüdü gerçekleştirilen kaya kütlelerinin üzerine yerleştirilerek kutunun bir noktası lokal bir koordinat sisteminin merkezine dönüştürülmüştür (Şekil 4.8b). Buradan hareketle kutunun uzun kenarı bu lokal koordinat sisteminin ve nokta bulutu üretiminde kullanılacak yazılımın Y eksenini olarak, kutunun köşe koordinatları (boyutları) ise jeoreferanslama için ihtiyaç duyulan YKN'ler olarak kullanılabilir hale gelmiştir (Şekil 4.8c). Nihai durumda bu yöntem ile her bir YKN için 3 adet ötelenme (X_0 , Y_0 , Z_0) ve 1 adet ölçek (λ) parametresi çözümlenerek jeoreferanslamanın yapılması mümkün olabilmektedir.

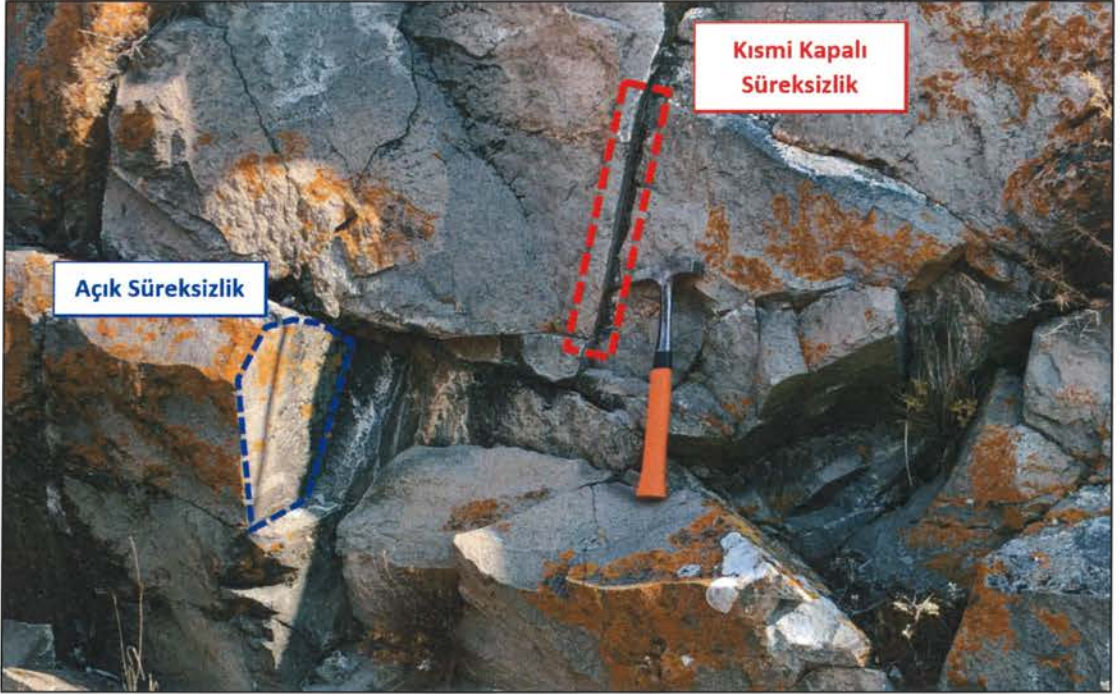


Şekil 4.8. Kamera pozisyonları (a); coğrafi kuzeye paralel şekilde yerleştirilen prizmatik karton kutu (b); jeoreferanslama için kullanılan YKN'ler (c).

5. SÜREKSİZLİK ANALİZLERİ

5.1. Hat Etüdü Verilerinin Değerlendirilmesi

ISRM'de (2007) önerilen şekilde gerçekleştirilen hat etüdü çalışmalarına ait veriler değerlendirilirken 3 ana, 2 alt grup olmak üzere 6 farklı grup dikkate alınmıştır. Ana gruplar andezit, kireçtaşı ve trakeandezit olarak tanımlanan kaya tipleri olarak belirlenirken; alt gruplar ise, ölçülen süreksizlik yüzeylerinin açık ya da kısmi kapalı olma durumuna göre belirlenmiştir. Yüzeyleri doğrudan ölçüm alınabilecek şekilde olan süreksizlikler açık süreksizlik olarak, yüzeyleri aralık şekilde gözlemlenen süreksizlikler ise kısmi kapalı süreksizlikler olarak tanımlanmıştır (Şekil 5.1). Lokasyonların tamamına ait hat etüdü verileri Çizelge 5.1'de özetlenmiştir.



Şekil 5.1. Açık ve kısmi kapalı olarak tanımlanan örnek süreksizlikler.

Çizelge 5.1. Hat etüdü özet tablosu.

Lokasyon	Litoloji	Aralık	Devamlılık	JRC	Bozunma	Açıklık	Dolgu	GSI		
								Değer Aralığı	Yapı	Yüzey Koşulu
YK-Loc1	Andezit	Orta Derece	Yüksek – Çok Yüksek	0 – 2 14 – 16	W2 – W3	Çok sıkı – Boşluklu	Yüzey boyaması, Kil Dolgulu	35 – 55	Çok Bloklu	Orta
YK-Loc2	Andezit	Orta Derece	Yüksek – Çok Yüksek	0 – 8	W2 – W3	Orta Der. – Boşluklu	Yüzey boyaması, Kil Dolgulu	55 – 77	Bloklu	İyi
YK-Loc3	Andezit	Orta Derece	Yüksek – Çok Yüksek	2 – 4	W2 – W3	Orta Der. – Boşluklu	Yüzey boyaması	60 – 85	Masif – Bloklu	İyi
YK-Loc4	Andezit	Geniş	Yüksek – Çok Yüksek	0 – 2	W2 – W3	Orta Der. – Boşluklu	Yüzey boyaması, Kil Dolgulu	45 – 65	Çok Bloklu	İyi
YK-Loc5	Andezit	Orta Derece	Çok Düşük – Çok Yüksek	0 – 2 16 – 18	W3 – W4	Orta Der. – Boşluklu	Yüzey boyaması, Kil Dolgulu	20 – 40	Çok Bloklu – Bloklu/Örselenmiş	Zayıf
AA-Loc1	Kireçtaşı	Orta Derece	Çok Düşük – Çok Yüksek	2 – 4 14 – 16	W3 – W4	Çok sıkı – Boşluklu	Yüzey boyaması, Fay Kili, Kil Dolgulu	15 – 35	Bloklu/Örselenmiş – Parçalanmış	Zayıf
AA-Loc2	Kireçtaşı	Geniş	Çok Yüksek	4 – 6 12 – 14	W2/W3 – W4	Aşırı Geniş – Boşluklu	Fay Kili, Kil ve Kalsit Dolgulu	30 – 45	Bloklu/Örselenmiş	İyi
AA-Loc3	Kireçtaşı	Dar	Orta – Çok Yüksek	6 – 8 16 – 18	W2 – W3	Geniş – Boşluklu	Kil ve Kalsit Dolgulu	35 – 50	Bloklu/Örselenmiş	Orta – İyi
BK-Loc1	Trakeandezit	Çok Dar	Çok Yüksek	0 – 2 8 – 10	W2 – W3	Aşırı Geniş – Boşluklu	Dolgusuz	55 – 75	Bloklu – Çok Bloklu	İyi
BK-Loc2	Trakeandezit	Orta	Çok Düşük – Düşük	2 – 4 18 – 20	W3	Geniş – Boşluklu	Dolgusuz	35 – 55	Çok Bloklu	İyi

5.1.1. Andezit Türü Kaya Kütlelerinde Yapılan Hat Etüdü Verilerinin Değerlendirilmesi

Andezit türü kaya kütlelerinin tamamında yapılan hat etüdü çalışmaları göz önüne alındığında 3 adet majör süreksizlik yönelimi (83/116, 72/048, 44/189) tespit edilmiştir (Şekil 5.2). Süreksizlikler orta derecede – geniş aralıklı olup, çok düşük – çok yüksek devamlılıktadır. Pürüzlülük ölçümleri sonucunda elde edilen Joint Roughness Coefficient (JRC) (Barton ve Choubey, 1977) değerleri 0 – 2 ve 16 – 18 arasında değişmektedir. Volkanik kayaç türü olması sebebi ile hat etüdü yapılan süreksizliklerin büyük bir çoğunluğu soğuma çatlağı niteliğindedir. Bundan ötürü özellikle çok yüksek devamlılıkta olan süreksizlikler dalgalıdır. Bozunma derecesi göz önüne alındığında az – tamamen bozunmuş süreksizlik yüzeyleri ile karşılaşmıştır. Süreksizlik açıklıkları çok sıkı – boşluklu olup, süreksizlik dolgusu olarak yüzey boyaması ve kil dolgusu tespit edilmiştir. Andezit türü kaya kütleleri üzerinde gerçekleştirilen GSI değerlendirmeleri doğrultusunda yapı özellikleri bloklu/örselenmiş – masif olarak, yüzey koşulu özellikleri ise zayıf – iyi olarak tanımlanmıştır. Bu tanımlamalar ışığında GSI değerleri 35 – 85 aralığında belirlenmiştir. Andezit türü kaya kütlelerinde tespit edilen süreksizliklerin yaklaşık %60'ı açık süreksizlik %40'ı kısmi kapalı süreksizlik olarak belirlenmiştir.

Açık süreksizliklere ait majör süreksizlik yönelimleri 84/117, 84/052 ve 45/209 olarak ölçülmüştür (Şekil 5.2). Bu süreksizlikler çok yüksek devamlılıkta olup az – orta derecede bozunmuştur. Nadiren dolgu gözlemlenmiş olup, gözlemlenen dolgular olarak yüzey boyaması olarak belirlenmiştir. Kısmi kapalı süreksizliklere ait majör süreksizlik yönelimleri ise 82/096, 48/178 ve 88/007 olarak ölçülmüştür (Şekil 5.2). Bu süreksizlikler çok düşük – çok yüksek devamlılıkta olup az – tamamen bozunmuştur. Genel olarak kil dolguludur.

5.1.2. Kireçtaşı Türü Kaya Kütlelerinde Yapılan Hat Etüdü Verilerinin Değerlendirilmesi

Kireçtaşı türü kaya kütlelerinin tamamında yapılan hat etüdü çalışmaları göz önüne alındığında 3 adet majör süreksizlik yönelimi (58/142, 28/059, 71/213) tespit edilmiştir (Şekil 5.2). Süreksizlikler dar – geniş aralıklı olup, çok düşük – çok yüksek devamlılıktadır. Pürüzlülük ölçümleri sonucunda elde edilen JRC değerleri 2 – 4 ve 16 – 18 arasında değişmektedir. Bozunma derecesi göz önüne alındığında az/orta – tamamen bozunmuş süreksizlik yüzeyleri ile karşılaşmıştır. Süreksizlik açıklıkları çok sıkı – boşluklu olup, süreksizlik dolgusu olarak yüzey boyaması, kil dolgusu, kalsit ve yer yer fay kili tespit edilmiştir. Kireçtaşı türü kaya kütleleri üzerinde gerçekleştirilen GSI değerlendirmeleri doğrultusunda yapı özellikleri bloklu/örselenmiş – parçalanmış olarak, yüzey koşulu özellikleri ise zayıf – iyi olarak tanımlanmıştır. Bu tanımlamalar ışığında GSI değerleri 35 – 50 aralığında belirlenmiştir. Kireçtaşı türü kaya kütlelerinde sedimanter oluşum ve tabakalanma özelliklerinin de etkisiyle tespit edilen süreksizliklerin yaklaşık %20'si açık süreksizlik %80'i kısmi kapalı süreksizlik olarak belirlenmiştir.

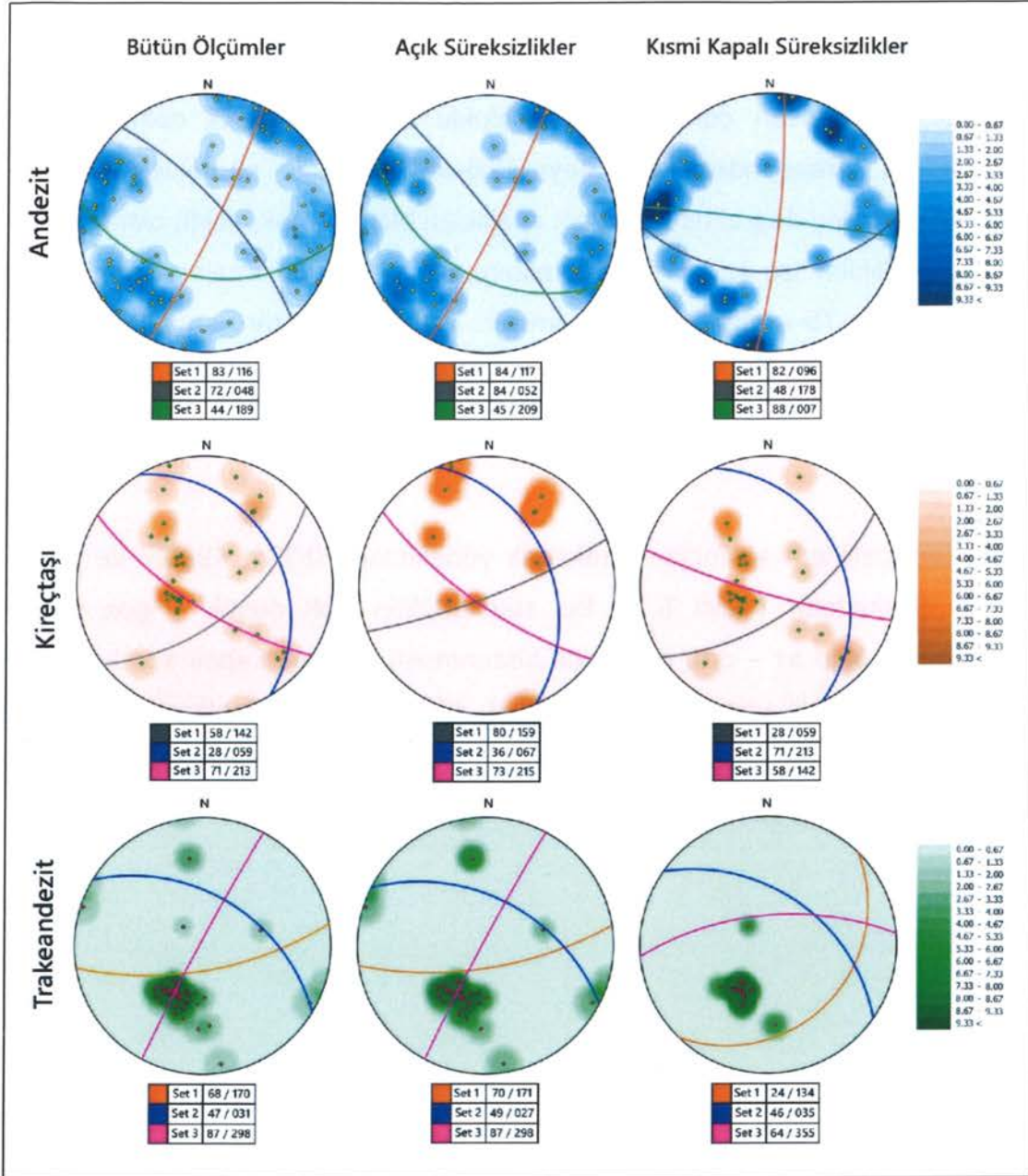
Açık süreksizliklere ait majör süreksizlik yönelimleri 80/159, 36/067 ve 73/215 olarak ölçülmüştür (Şekil 5.2). Bu süreksizlikler çok düşük – çok yüksek devamlılıkta olup orta – yüksek derecede bozunmuştur. Gözlemlenen dolgular kalsit, kil dolgu ve yer yer fay kili olarak belirlenmiştir. Kısmi kapalı süreksizliklere ait majör süreksizlik yönelimleri ise 28/059, 71/213 ve 58/142 olarak ölçülmüştür (Şekil 5.2). Bu süreksizlikler çok düşük – çok yüksek devamlılıkta olup az – tamamen bozunmuştur. Genel olarak kalsit ve kil dolguludur.

5.1.3. Trakeandezit Türü Kaya Kütlelerinde Yapılan Hat Etüdü Verilerinin Değerlendirilmesi

Trakeandezit türü kaya kütlelerinin tamamında yapılan hat etüdü çalışmaları göz önüne alındığında 3 adet majör süreksizlik yönelimi (68/170, 47/031, 87/298) tespit edilmiştir (Şekil 5.2). Süreksizlikler çok dar – orta aralıklı olup, çok düşük – çok yüksek devamlılıktadır. Pürüzlülük ölçümleri sonucunda elde edilen JRC

değerleri 0 – 2 ve 18 – 20 arasında değişmektedir. Bozunma derecesi göz önüne alındığında az – orta derecede bozunmuş süreksizlik yüzeyleri ile karşılaşmıştır. Süreksizlik açıklıkları çok geniş – boşluklu olup süreksizlik dolgusu tespit edilmemiştir. Trakeandezit türü kaya kütleleri üzerinde gerçekleştirilen GSI değerlendirmeleri doğrultusunda yapı özellikleri bloklu – çok bloklu olarak, yüzey koşulu özellikleri ise iyi olarak tanımlanmıştır. Bu tanımlamalar ışığında GSI değerleri 35 – 75 aralığında belirlenmiştir. Trakeandezit türü kaya kütlelerinde tespit edilen süreksizliklerin yaklaşık %60'ı açık süreksizlik %40'ı kısmi kapalı süreksizlik olarak belirlenmiştir.

Açık süreksizliklere ait majör süreksizlik yönelimleri 70/171, 49/027 ve 87/298 olarak ölçülmüştür (Şekil 5.2). Bu süreksizlikler çok düşük – çok yüksek devamlılıkta olup az – orta derecede bozunmuştur. Kısmi kapalı süreksizliklere ait majör süreksizlik yönelimleri ise 24/134, 46/035 ve 64/355 olarak ölçülmüştür (Şekil 5.2). Bu süreksizlikler çok düşük – çok yüksek devamlılıkta olup az – orta derecede bozunmuştur. Dolgu gözlemlenmemiştir.



Şekil 5.2. Kaya türü, açık ve kısmi kapalı süreksizlik özelliklerine göre majör süreksizlik setleri.

5.2. Fotogrametrik Analizler

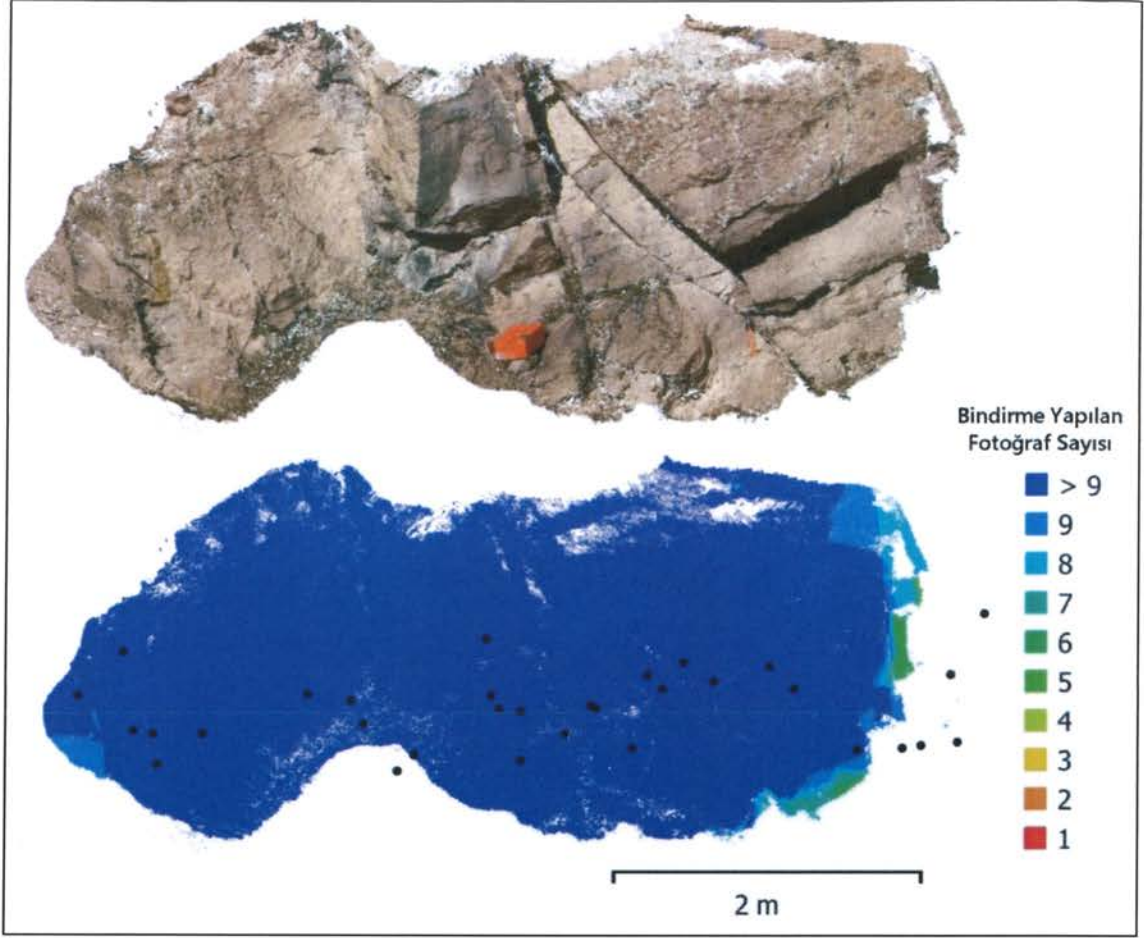
5.2.1. Nokta Bulutu Verisinin Üretilmesi

Nokta bulutu verisi elde edilmesi işleminde Lenovo Thinkpad E490 (CPU: Intel Core i5-8265U 1.60 GHz, RAM: 8 gb, Graphical Card: AMD Radeon RX 550X 128 bit 2 gb) dizüstü bilgisayar ve Agisoft Metashape Professional (1.6.4) yazılımı kullanılmıştır. Yazılım standart bir SfM akışındaki gibi ilk adım olarak alignment (karşılıklı yöneltme) işlemini gerçekleştirmektedir. Bu adımda fotoğraflar içerisinde EXIF (Exchangeable Image File) olarak yer alan konum bilgileri kullanılmış ve hassasiyet değeri "highest" olarak seçilmiştir. İşlem sonucunda Çizelge 4.2'de verilen kamera kalibrasyon parametreleri de çözümlenerek yaklaşık kamera konumları tespit edilmiştir ve karşılıklı yöneltme gerçekleştirilmiştir. Bir sonraki adımda Bölüm 4.6'da belirtildiği şekilde konumlandırılan prizmatik kutunun köşe noktaları YKN olarak kullanılarak jeoreferanslama yapılmıştır. Bu jeoreferanslama 3B modelin coğrafi konum olarak değil, coğrafi yön ve ölçek olarak araziye temsil eden lokal bir koordinat sistemine oturtulması şeklinde gerçekleştirilmesinden ötürü kısmi bir jeoreferanslama olarak tanımlanmaktadır. Nihai durumda 10 farklı kaya kütlesi için gerçekleştirilen yöneltme ve jeoreferanslama sonucunda elde edilen RMSE (Root Mean Square Error) değerleri 1,24 mm – 13,45 mm aralığında, GSD (Ground Sampling Distance) değerleri ise 0,65 mm/pix – 1,33 mm/pix aralığında değişmekte olup Çizelge 5.2'de verilmiştir. Bu işlem sonrasındaki aşama sıkı nokta bulutu (dense point cloud) oluşturulması aşamasıdır. Sıkı nokta bulutu üretimi orta kalitede (medium quality) gerçekleştirilmiştir. Dense point cloud quality temel olarak nokta bulutunda yer alan nokta sayısını etkilemektedir. Agisoft Metashape'de sıkı nokta bulutu oluşturulurken kullanılan bir diğer ayar da Depth filtering'dir. Bu ayar, nokta bulutunda yer alan noktalar içerisindeki gürültü (noisy) ve aykırı (outlier) noktaların giderilmesi için bir takım filtreleme algoritmalarından oluşmaktadır. Süreksizlik yüzeyine ait ayrışma ve pürüzlülük özelliklerinin nokta bulutu verisi üzerinden gerçekleştirilecek süreksizlik ölçümlerine olan etkisinin daha hassas tespit edilebilmesi adına sıkı nokta bulutu verisi üretiminde depth filtering kullanılmamıştır. Çalışılan kaya kütlelerine ait olarak toplamda 2,5 milyon – 9,5 milyon nokta içeren nokta bulutu verileri üretilmiş olup bu üretim süreci 2 – 14 dakika arası sürmüştür (Çizelge 5.2).

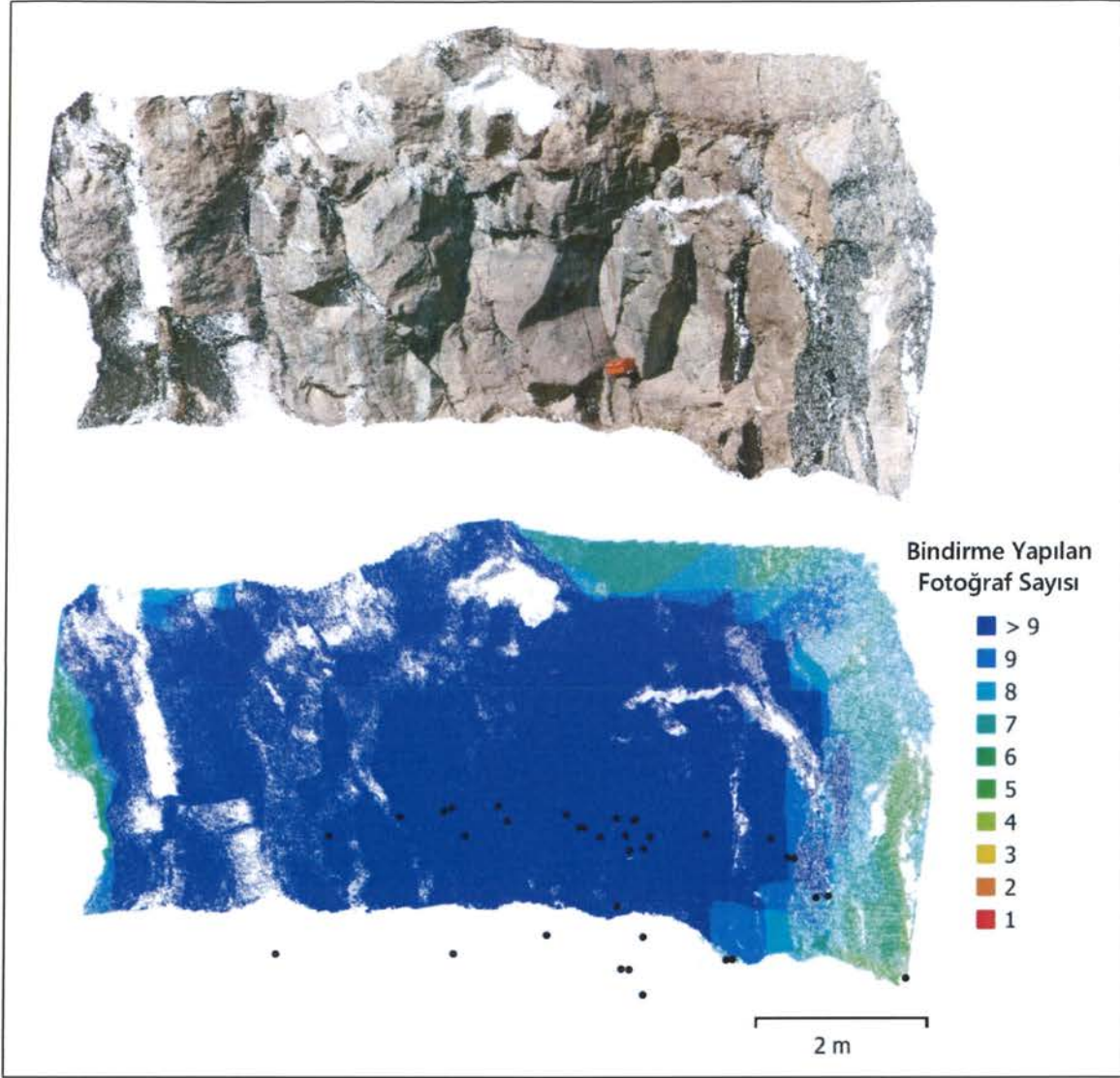
Çizelge 5.2. Nokta bulutu verisi özet tablosu.

Lokasyon	Yöneltilen Fotoğraf Sayısı	YKN Sayısı	RMSE (mm)	Hata (pix)	GSD (mm/pix)	Bağlama Nokta Sayısı	Yaklaşık Nokta Sayısı
YK-Loc1	35	5	5,26	2,921	0,65	38418	3 300 000
YK-Loc2	37	5	4,53	3,281	1,04	47072	4 350 000
YK-Loc3	26	5	3,47	6,890	1,33	34083	2 650 000
YK-Loc4	37	6	8,73	2,091	1,03	45495	4 800 000
YK-Loc5	24	5	7,67	6,404	0,68	22396	4 300 000
AA-Loc1	62	8	9,08	3,209	0,85	65002	9 200 000
AA-Loc2	55	5	4,07	7,416	0,96	70614	7 300 000
AA-Loc3	66	5	1,57	6,547	1,10	66763	9 150 000
BK-Loc1	57	4	13,45	2,802	0,77	64780	8 200 000
BK-Loc2	44	3	1,24	5,407	0,65	44010	5 700 000

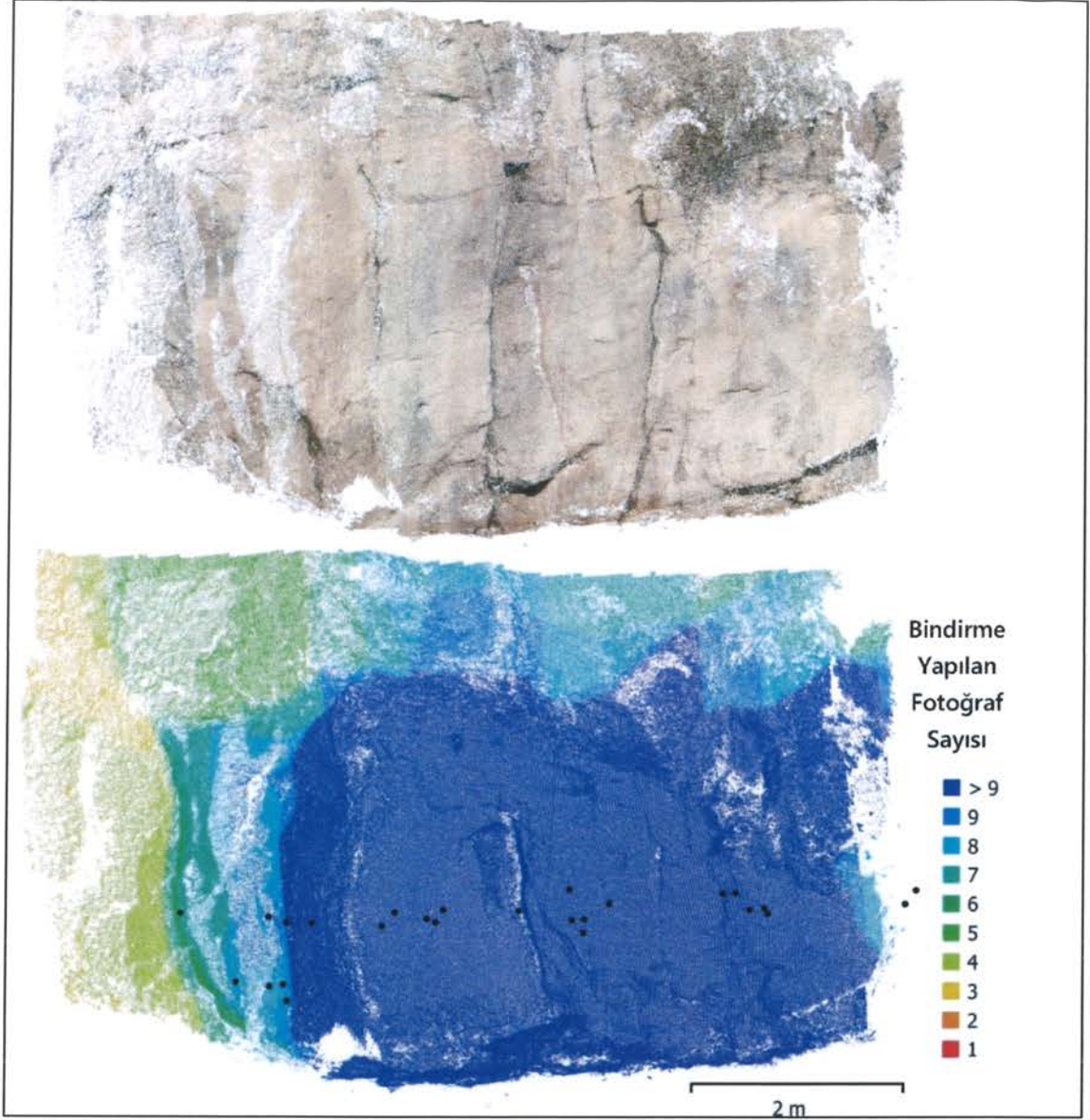
Yazılım çıktıları itibariyle, oluşturulan nokta bulutu veri üretimindeki görüntü bindirme sayısının 9'dan fazla olduğu tespit edilmiştir. Çalışma yapılan lokasyonlara ait nokta bulutu görünümleri ve görüntü bindirme sayıları Şekil 5.3 – Şekil 5.12 arasında sunulmuştur.



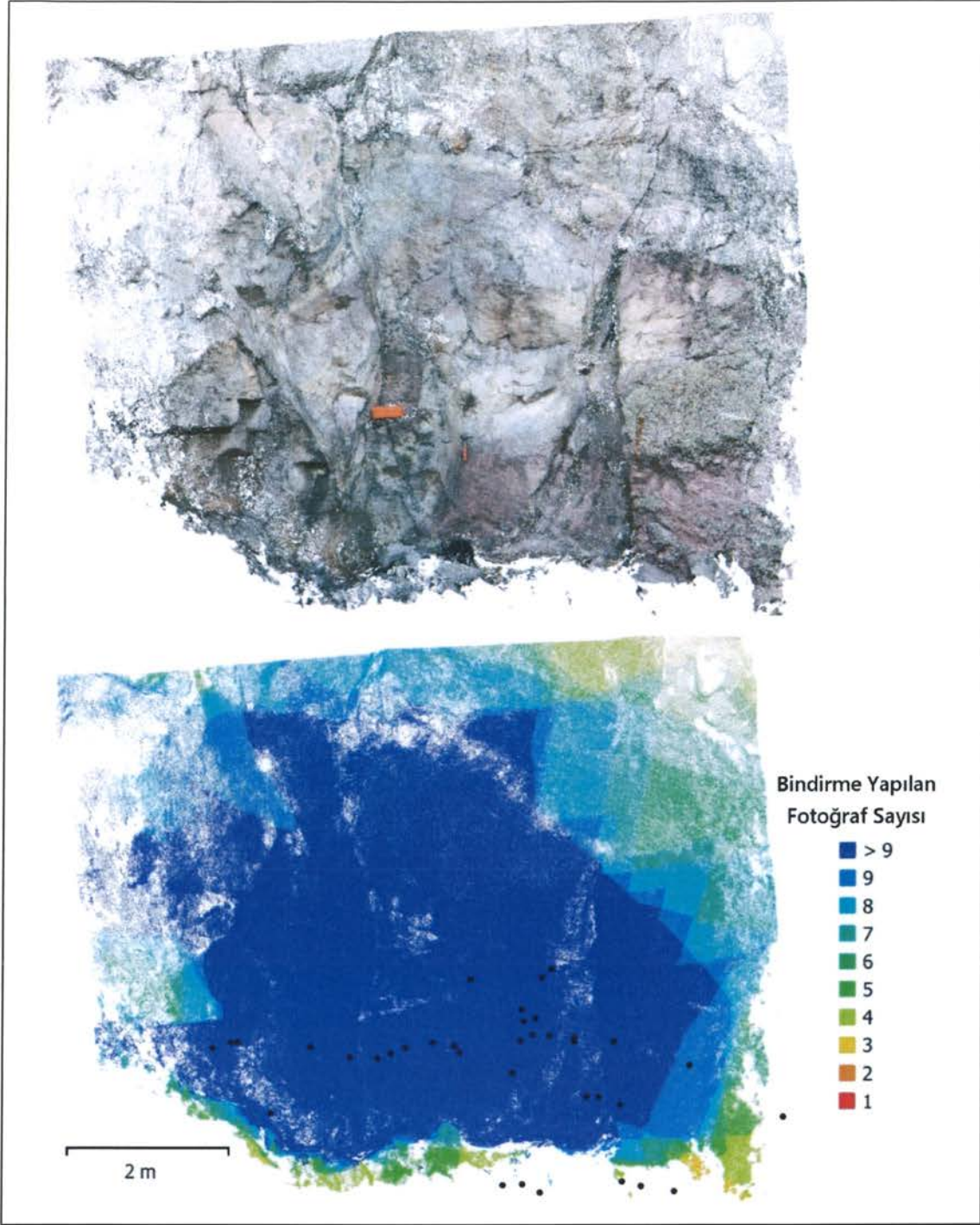
Şekil 5.3. YK-Loc1 Nokta bulutu verisi ve görüntü bindirme oranları.



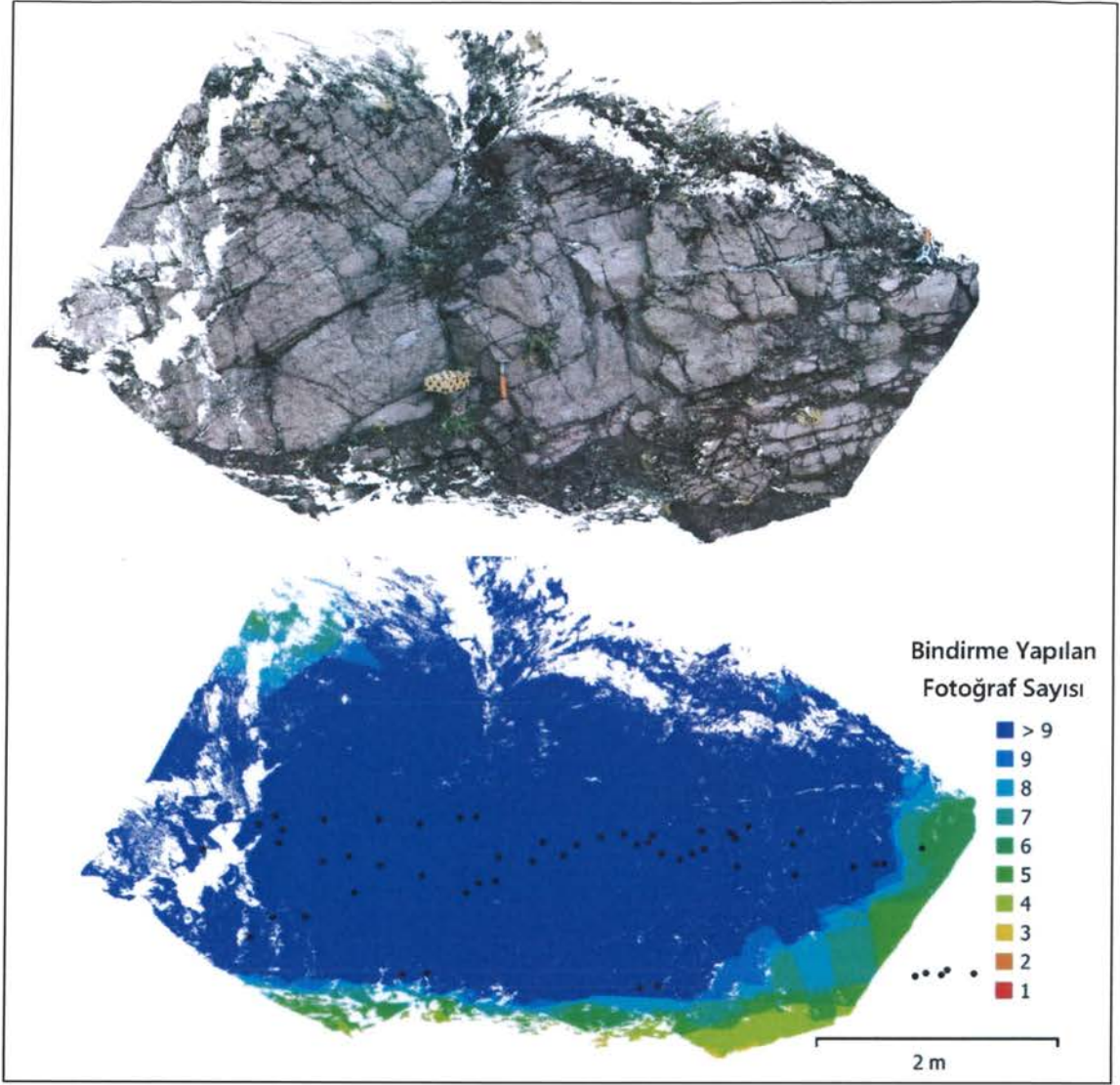
Şekil 5.4. YK-Loc2 Nokta bulutu verisi ve görüntü bindirme oranları.



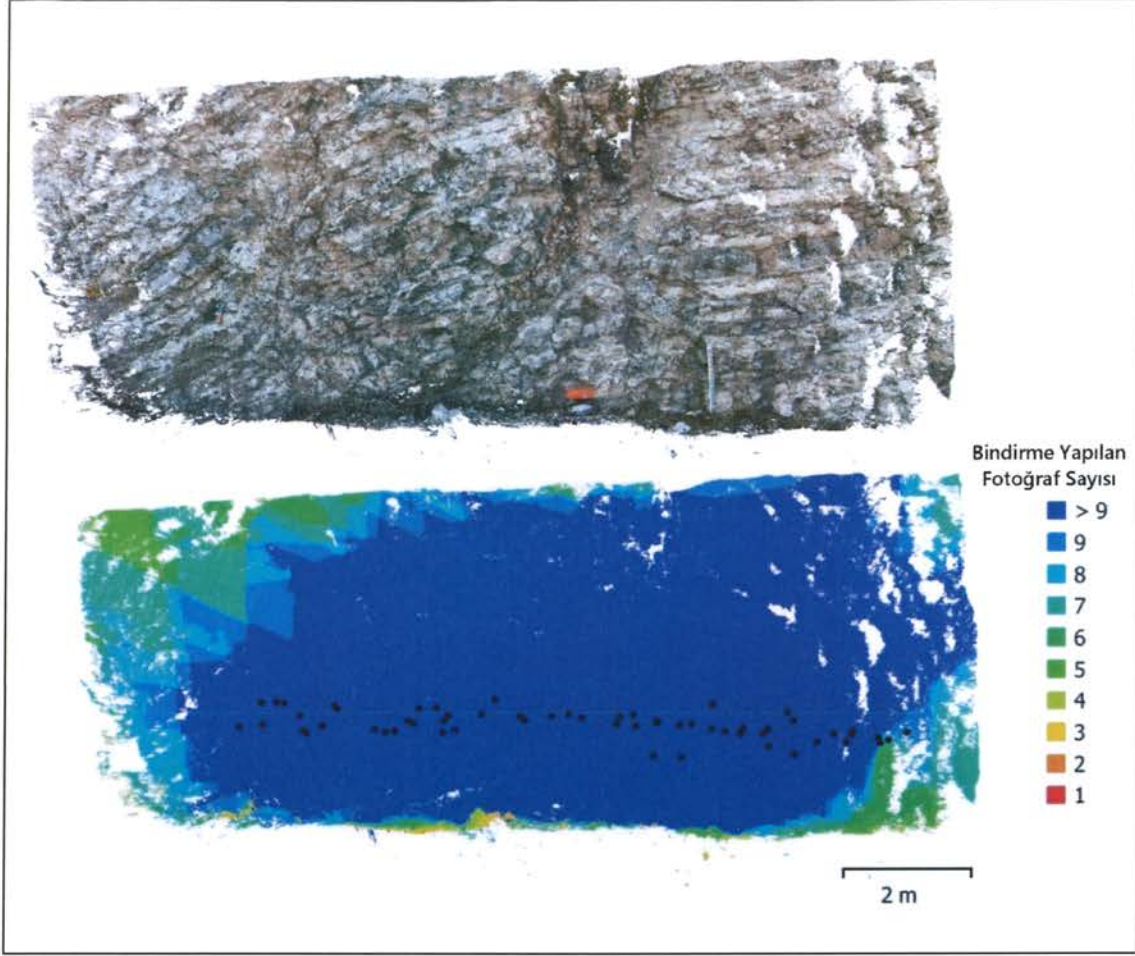
Şekil 5.5. YK-Loc3 Nokta bulutu verisi ve görüntü bindirme oranları.



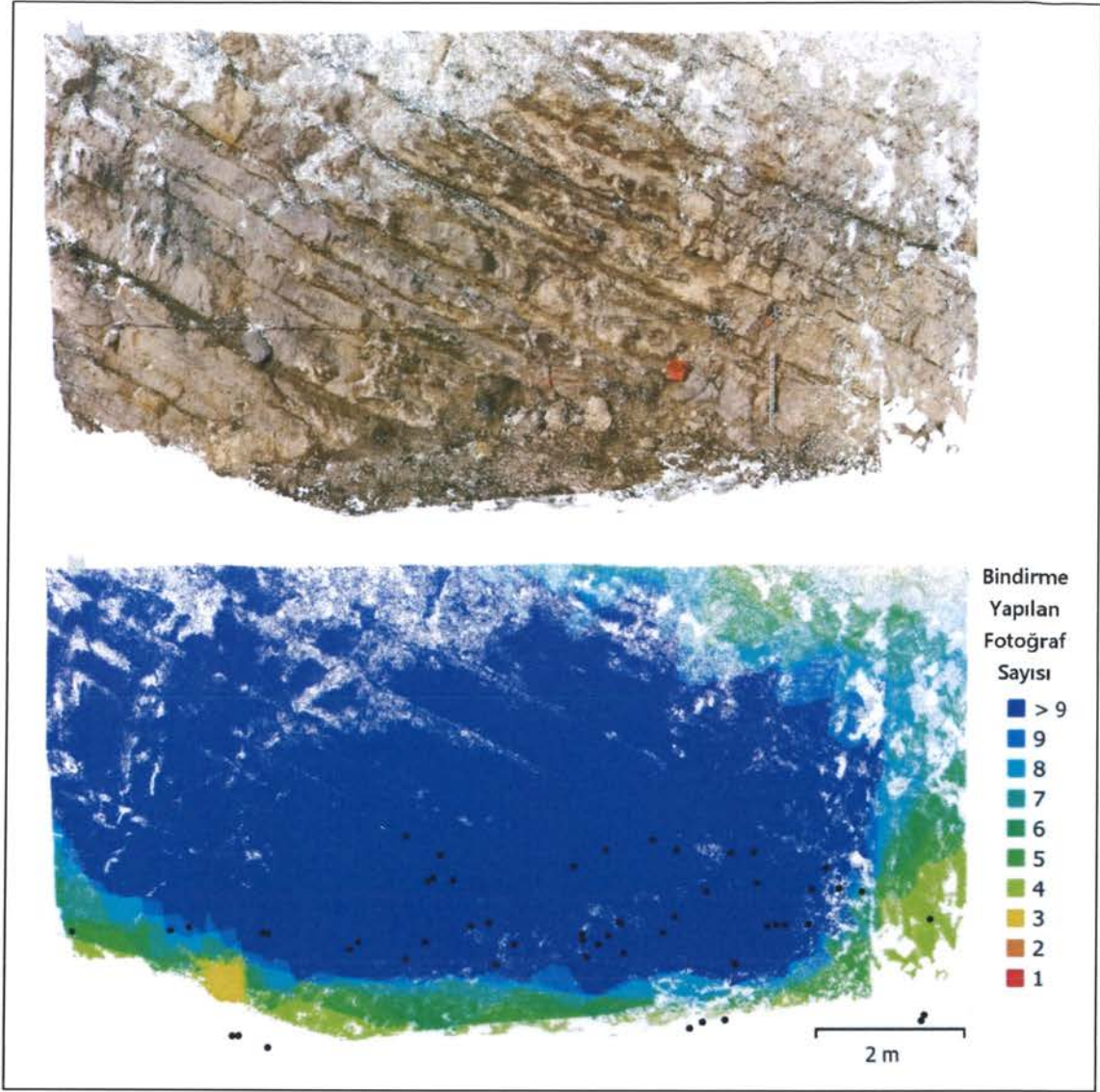
Şekil 5.6. YK-Loc4 Nokta bulutu verisi ve görüntü bindirme oranları.



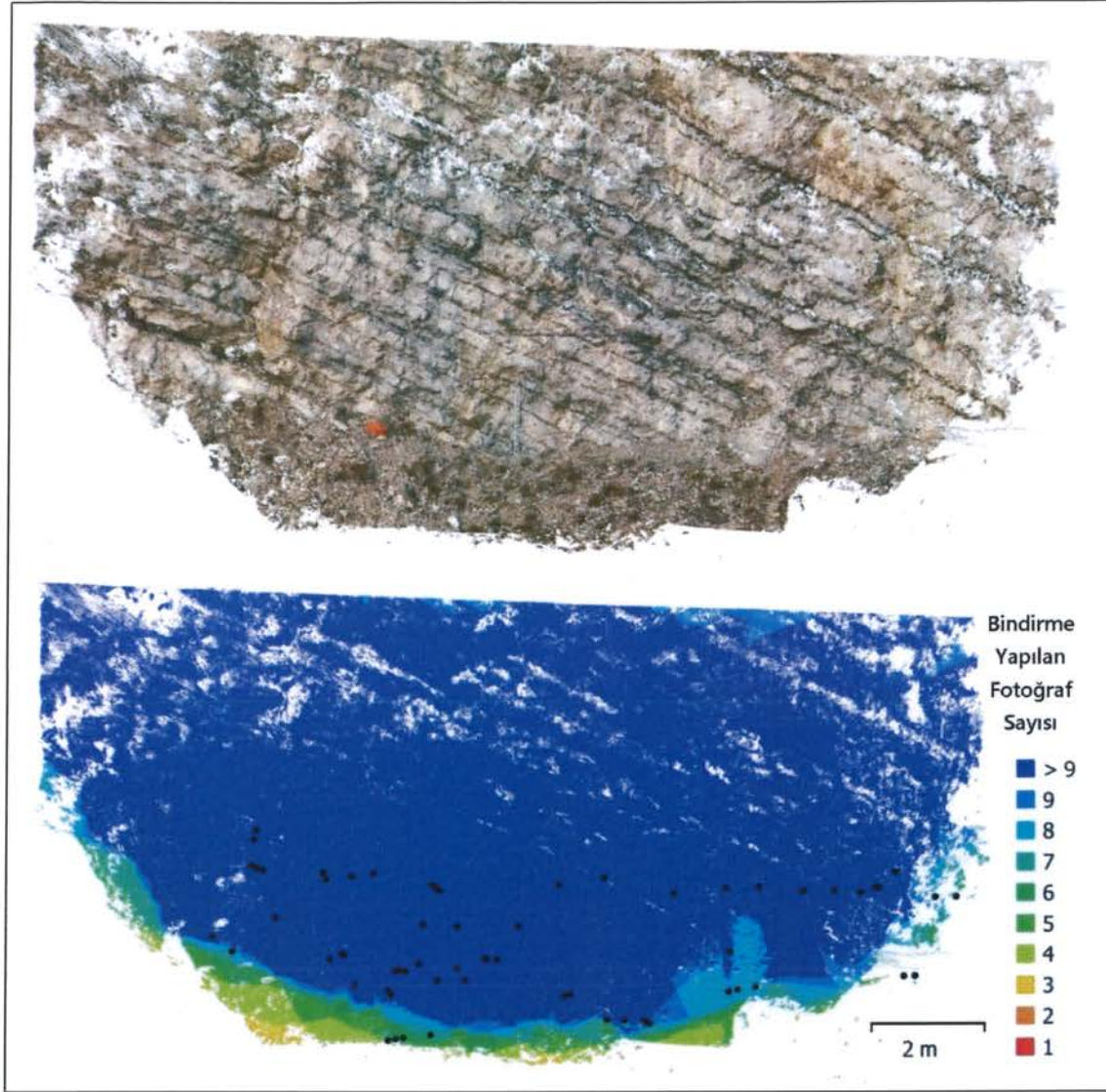
Şekil 5.7. YK-Loc5 Nokta bulutu verisi ve görüntü bindirme oranları.



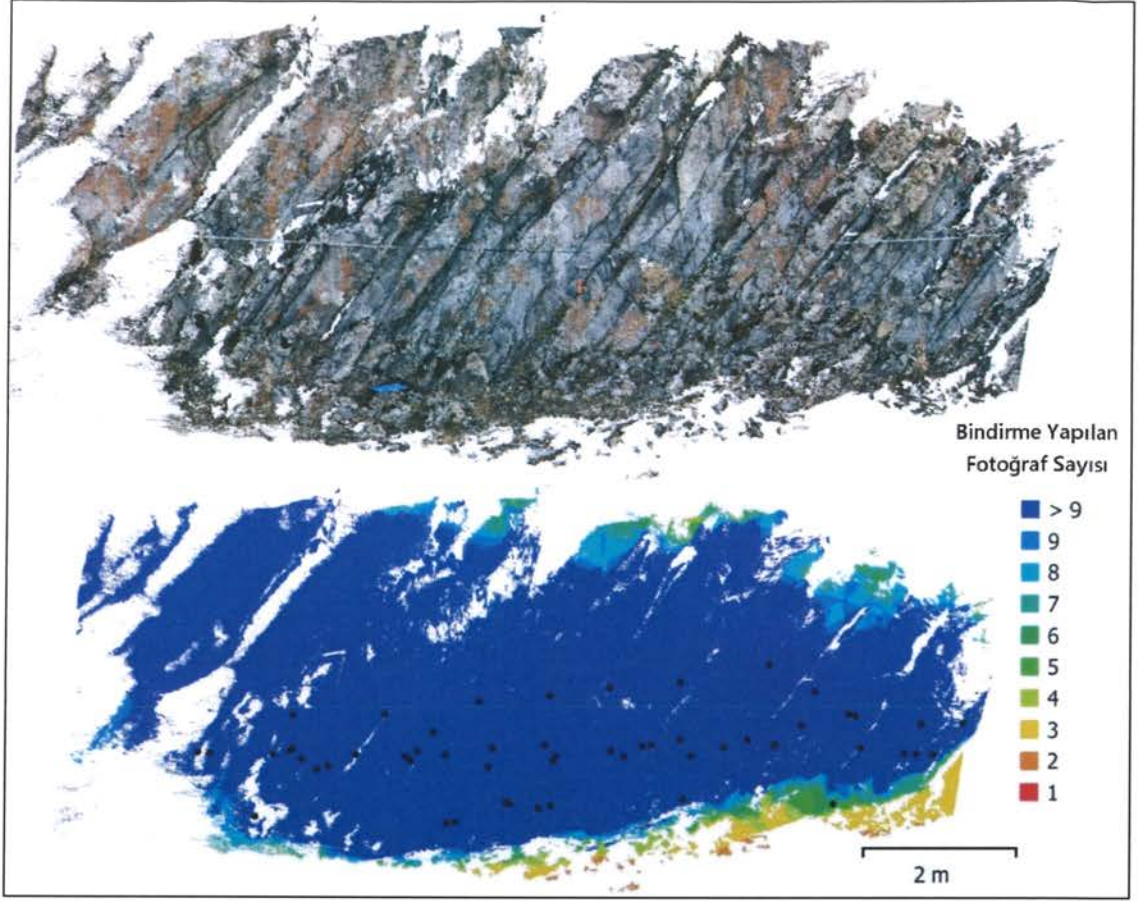
Şekil 5.8. AA-Loc1 Nokta bulutu verisi ve görüntü bindirme oranları.



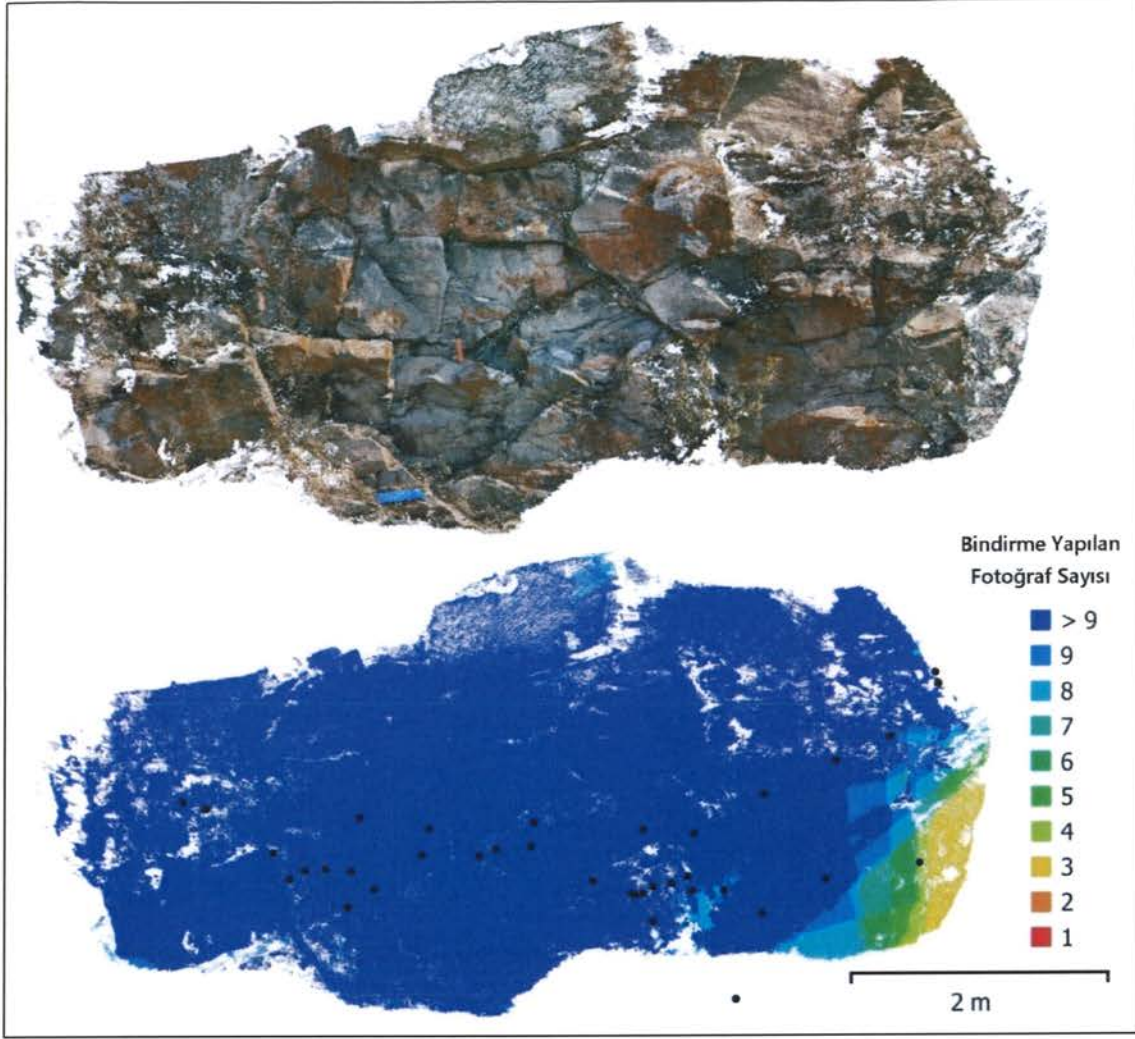
Şekil 5.9. AA-Loc2 Nokta bulutu verisi ve görüntü bindirme oranları.



Şekil 5.10. AA-Loc3 Nokta bulutu verisi ve görüntü bindirme oranları.



Şekil 5.11. BK-Loc1 Nokta bulutu verisi ve görüntü bindirme oranları.

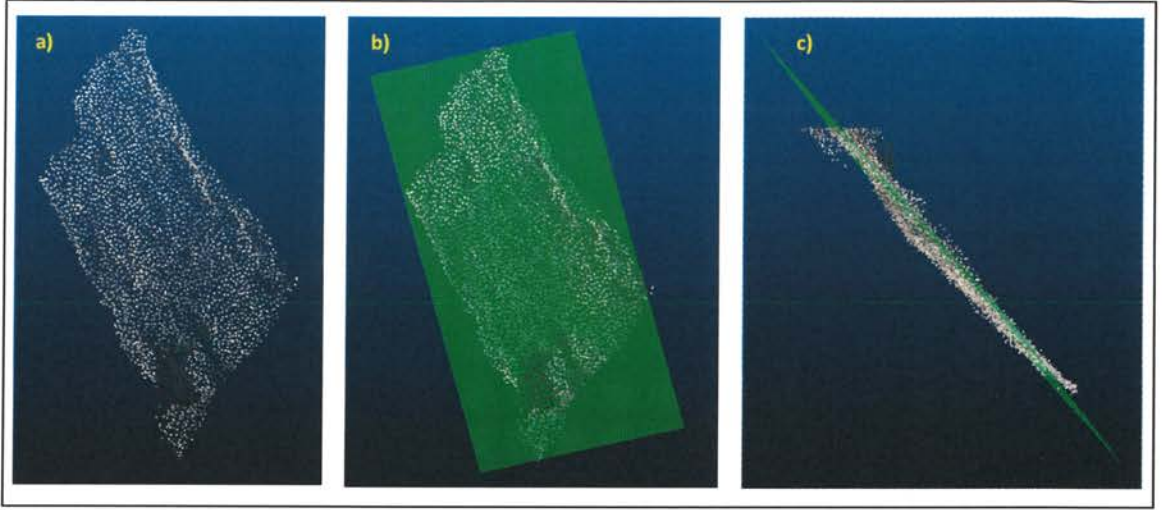


Şekil 5.12. BK-Loc2 Nokta bulutu verisi ve görüntü bindirme oranları.

5.2.2. Nokta Bulutu Verisi İle Yapılan Süreksizlik Yönelim Ölçümleri

İnceleme alanlarına nokta bulutu verileri süreksizlik yönelim ölçümleri için CloudCompare (Girardeau-Montaut, 2016) yazılımına aktarılmıştır. CloudCompare yalnızca süreksizlik yönelim ölçümleri için kullanılmış, pürüzlülük ve ayrışma gibi süreksizlik özelliklerinin nokta bulutundaki özelliklerinin kaybedilmemesi adına herhangi bir alt örnekleme (subsampling) uygulanmamıştır. Hat etüdü ile ölçülen her bir süreksizlik yönelimi nokta bulutu verisi üzerinden Compass Plugin (Thiele et al., 2017) kullanılarak ölçülmüştür. Bazı süreksizlikler nokta bulutunda tespit edilememiş olup toplamda hat etüdü ile çalışılan 164 süreksizliğin 144 adedinin ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümler iki farklı süreksizlik tipine göre iki farklı yöntemle gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki,

doğrudan süreksizlik düzlemlerinin gözlenebildiği açık süreksizliklerde uygulanan least square plane fitting (LSPF) yöntemidir. LSPF nokta bulutundaki süreksizlik yüzeyini oluşturan noktalar ile arasındaki uzaklık kareleri toplamı minimize edilmiş bir düzlem oluşturulmasına olanak sağlar (Şekil 5.13). Yöntem kullanılarak süreksizlikler üzerinde oluşturulan bu düzlemlerin eğim/eğim yönü miktarları, ilgili süreksizliklerin yönelim değerleri olarak ölçülmüştür.



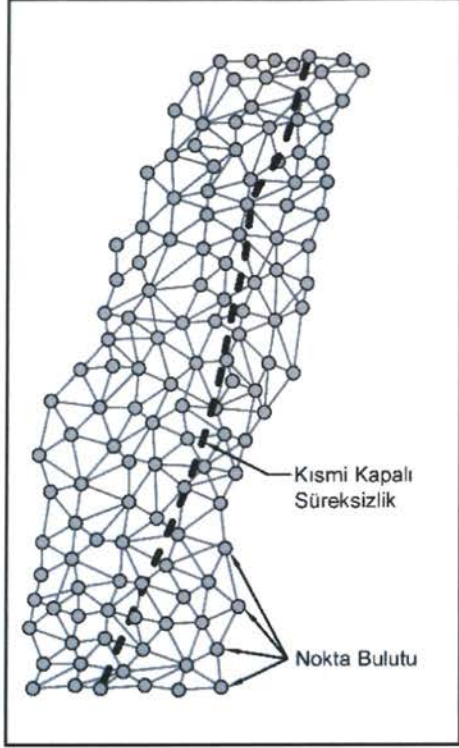
Şekil 5.13. Süreksizlik yüzeyine ait nokta bulutu verisi (a) LSPF yöntemi ile oluşturulan yüzey (b, c).

Kısmi kapalı süreksizliklerde ise süreksizlik yüzeyi nokta bulutu içerisinde doğrudan gözlemlenemediği için öncelikle süreksizlik yüzeylerini temsil eden noktalar elde edilmiş, daha sonra bu noktalar üzerinde LSPF uygulanmıştır. Kısmi kapalı süreksizliklerin yüzeylerini temsil eden noktaların elde edilmesi için least cost path (LCP) algoritması kullanılmıştır. Algoritma, nokta bulutu verisinde yer alan kısmi kapalı süreksizlik üzerinde bir yol belirlenmesi ve bu yolu oluşturan noktaların çıkartılması temeline dayanmaktadır (Şekil 5.14). Bu yol belirlenirken kullanıcı başlangıç ve bitiş noktalarını belirlemekte, algoritma da bu iki nokta arasındaki noktaların “darkness” özelliklerine bağlı olarak optimum yolu oluşturmaktadır. Kısmi kapalı süreksizlikler için bu algoritma kullanılarak çıkartılan noktalar süreksizlik yüzeyini oluşturan nokta bulutu verisi olarak kabul edilmiş ve LSPF uygulanarak ve yönelimler ölçülmüştür (Şekil 5.15).

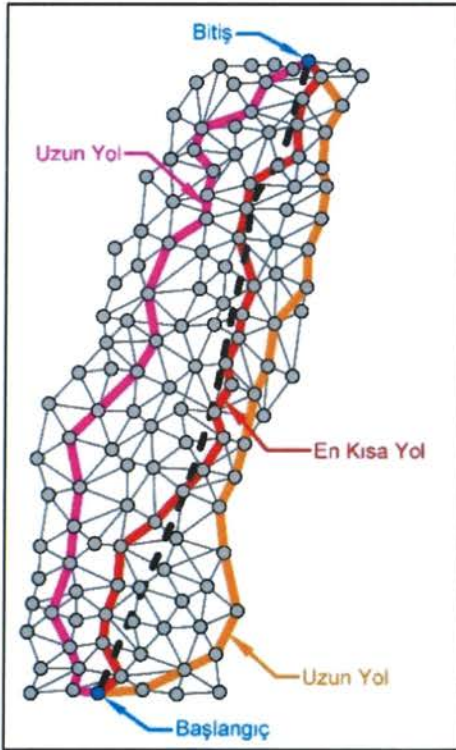
Kısmi Kapalı Süreksizlik



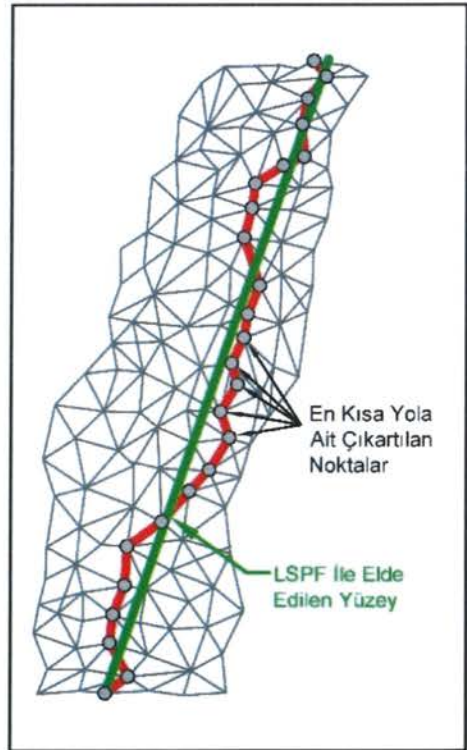
Nokta Bulutundaki Konumu



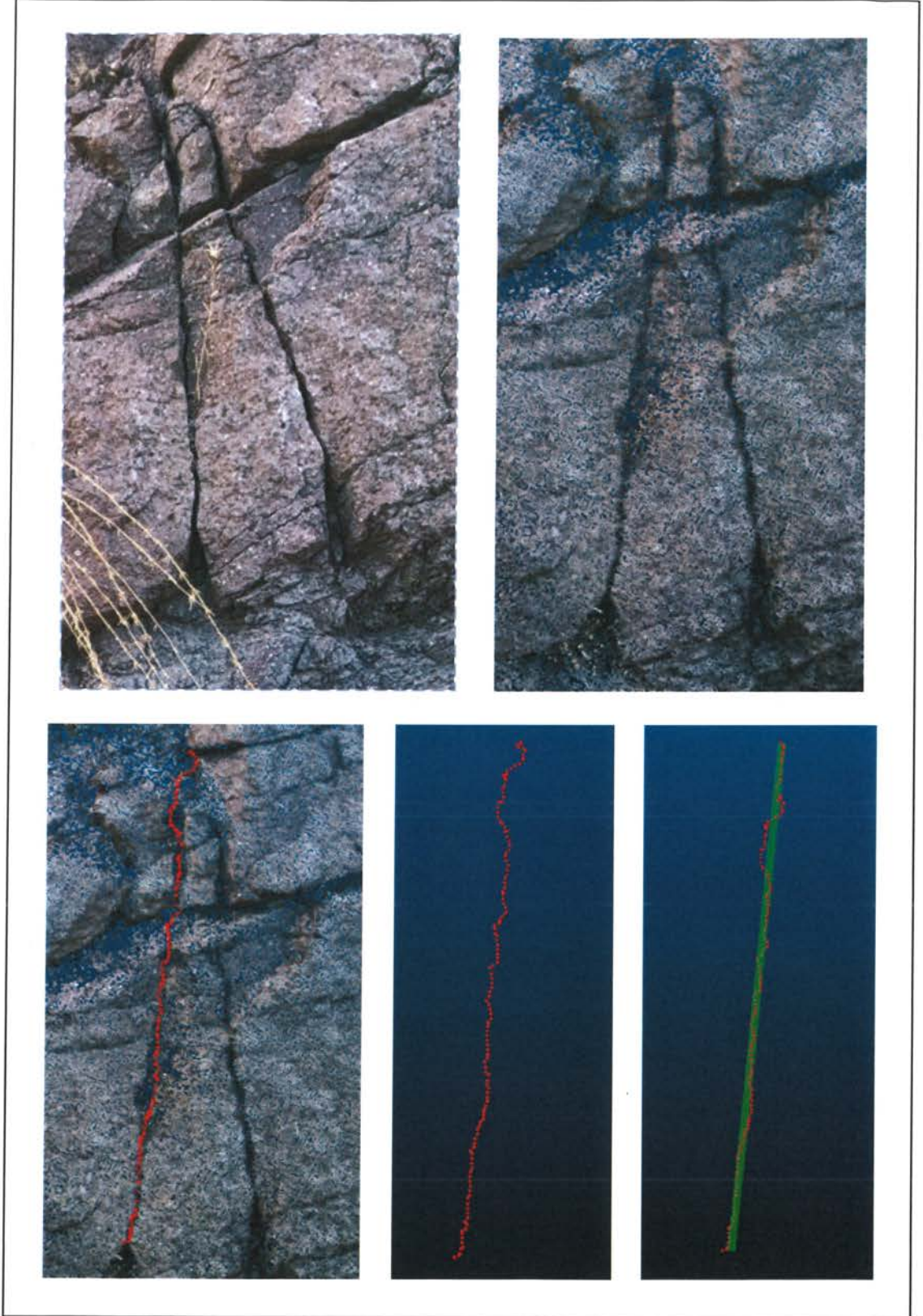
LCP Uygulanması



Noktaların Çıkarılması ve LSPF Uygulanması



Şekil 5.14. LCP + LSPF uygulaması şematik gösterim.



Şekil 5.15. LCP + LSPF nokta bulutu üzerinde uygulama örneği.

5.2.3. Kaya Kütlesi ve Süreksizlik Koşullarının Nokta Bulutu Üzerinden Yapılan Süreksizlik Yönelim Ölçümlerine Etkisi

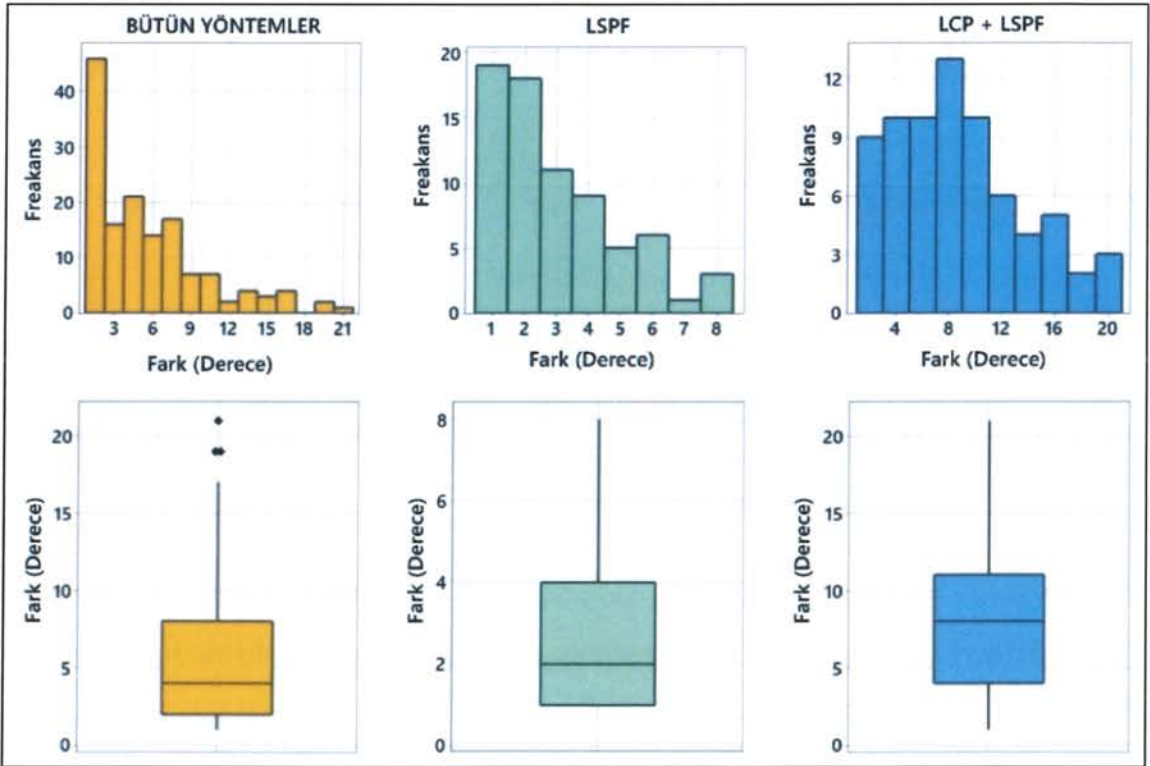
Yerinde yapılan ve nokta bulutu üzerinden ölçülen yönelim değerleri birbirleri ile karşılaştırılırken, her iki yerde de ölçülen süreksizlik düzlemlerine ait normaller arasındaki açı farkları kullanılmıştır (Eş. 5.1).

$$\cos \theta = \frac{|n_1 \cdot n_2|}{\|n_1\| \|n_2\|} \quad (5.1)$$

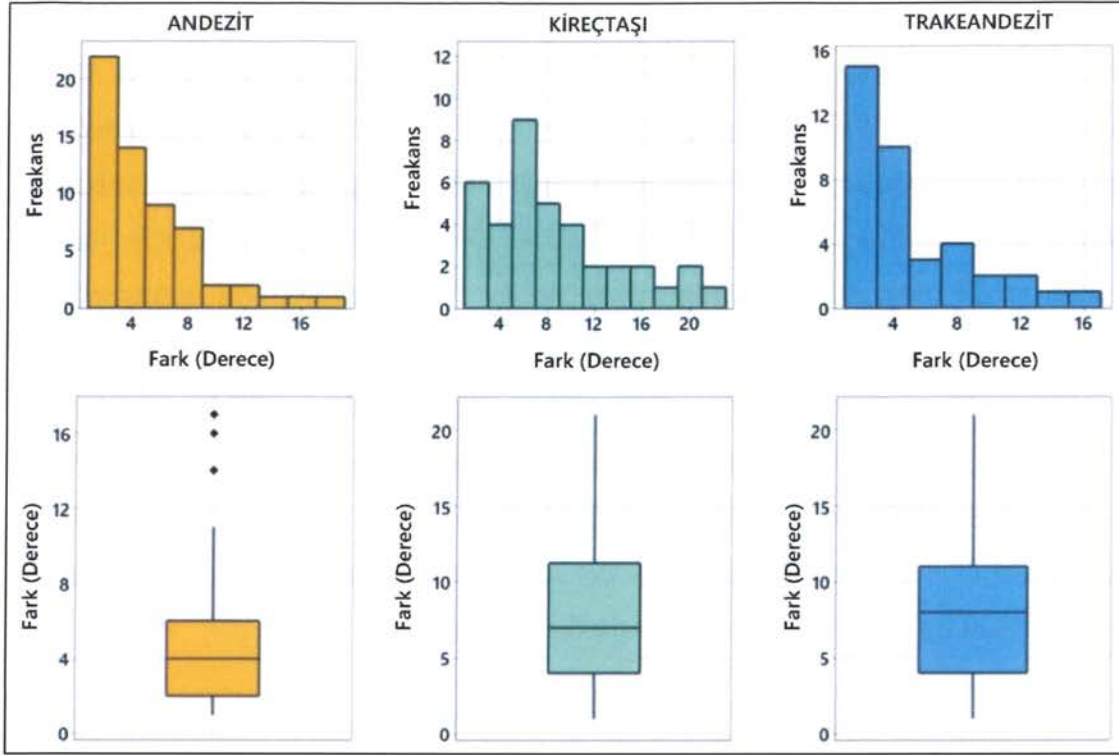
Buna göre bütün kaya ve süreksizlik türündeki ölçümler birlikte dikkate alındığında yerinde yapılan yönelim ölçümleri ile nokta bulutu üzerinden yapılan yönelim ölçümleri arasındaki fark miktarları ortalama 6° derece olup, 1° – 21° aralığında değişirken standart sapma da 5° olarak hesaplanmıştır. LSPF ve LCP + LSPF yöntemleri ayrı ayrı ele alındığında LSPF için fark miktarı ortalama 3° olmak kaydıyla 1° – 8° aralığında; LCP + LSPF için fark miktarı ortalama 8° olmak kaydıyla 1° – 21° aralığında hesaplanmıştır. Standart sapma değerleri ise LSPF için 2°, LCP + LSPF için 5°'dir (Şekil 5.16). Kaya türlerine ilişkin farklar değerlendirildiğinde; andezit türü kaya kütleleri için yerinde yapılan yönelim ölçümleri ile nokta bulutu üzerinden yapılan yönelim ölçümleri arasındaki fark 4° standart sapma ile ortalama 5° olarak hesaplanmış olup, 1° – 17° aralığında değişmektedir. Kireçtaşı türündeki kaya kütleleri için fark miktarları 1° – 21° aralığında değişmekte olup 8° ortalama ve 5° standart sapmaya sahiptir. Trakeandezit türü kaya kütleleri için fark miktarı 5° ortalama ile 1° – 15° aralığında değişmekte olup standart sapma değeri 4°'dir (Şekil 5.17).

Sahada ve nokta bulutunda gerçekleştirilen ölçümlerin birbiri arasındaki farkları etkileyen bir diğer faktör de süreksizlik yüzeylerinin ayrışma derecesidir. LSPF ve LCP + LSPF yöntemleri birlikte ele alındığında W2 – W3 ayrışma derecesi için fark miktarlarının ortalama 5° olarak 1° – 19° aralığında değiştiği, standart sapma değerinin de 4° olduğu tespit edilmiştir. W3 ayrışma derecesi için bu değerler 6° ortalama, 4° standart sapma ile 1° – 21° aralığında; W3 – W4 ayrışma derecesi için ise 7° ortalama, 5° standart sapma ile 1° – 19° aralığında değişmektedir.

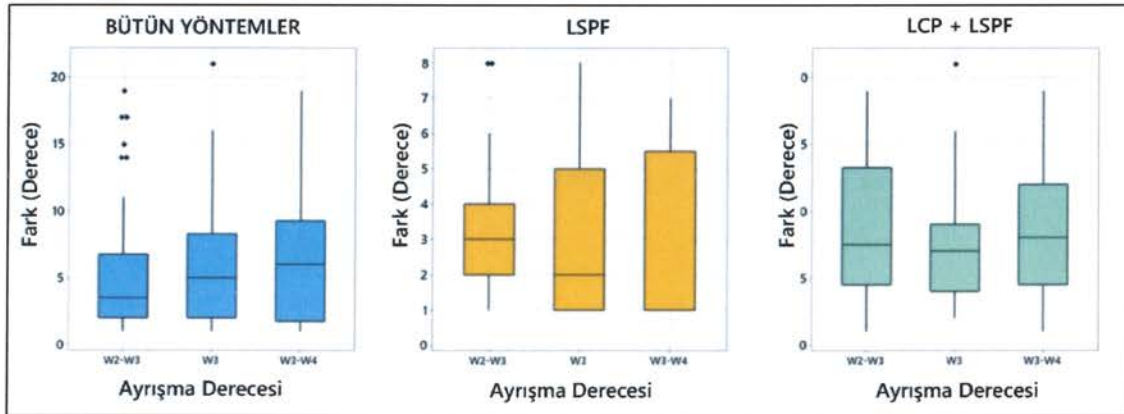
Ayrışma derecesinin yalnızca LSPF yöntemi üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde; W2 – W3 için 3° ortalama, 2° standart sapma ile $1^\circ - 8^\circ$ aralığında değiştiği hesaplanmıştır. W3 ayrışma derecesi söz konusu olduğunda fark miktarları yine $1^\circ - 8^\circ$ arasında değişmekte olup, 2° standart sapma ile ortalama 3° olarak hesaplanmıştır. W3 – W4 ayrışma derecesi için ise fark miktarları 3° ortalama, 2° standart sapma ile $1^\circ - 7^\circ$ aralığında değişmektedir. LCP+LSPF yöntemi kullanıldığında W2 – W3 ayrışma derecesi için oluşan fark miktarları $1^\circ - 19^\circ$ aralığında değişmekte olup, ortalama 9° 'dir. Bu ayrışma derecesi için standart sapma miktarı 5° olarak hesaplanmıştır. LCP+LSPF kullanımında W3 ayrışma derecesi için fark miktarları 8° ortalama, 5° standart sapma ile $2^\circ - 21^\circ$ aralığında; W3 – W4 ayrışma derecesi için ise 9° ortalama, 5° standart sapma ile $1^\circ - 19^\circ$ aralığında değişmektedir.



Şekil 5.16. Farklı yöntemlerin fark miktarlarına ait histogram ve kutu grafikleri.



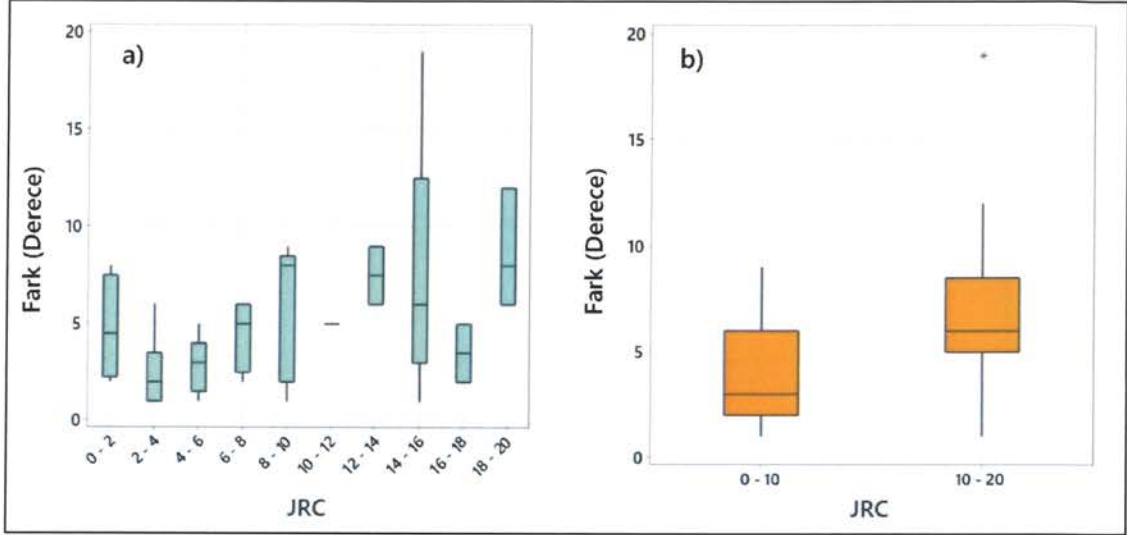
Şekil 5.17. Farklı kaya türlerinin fark miktarlarına ait histogram ve kutu grafikleri.



Şekil 5.18. Farklı ayırışma derecelerine göre hesaplanan ölçüm farklarına ait histogram ve kutu grafikleri.

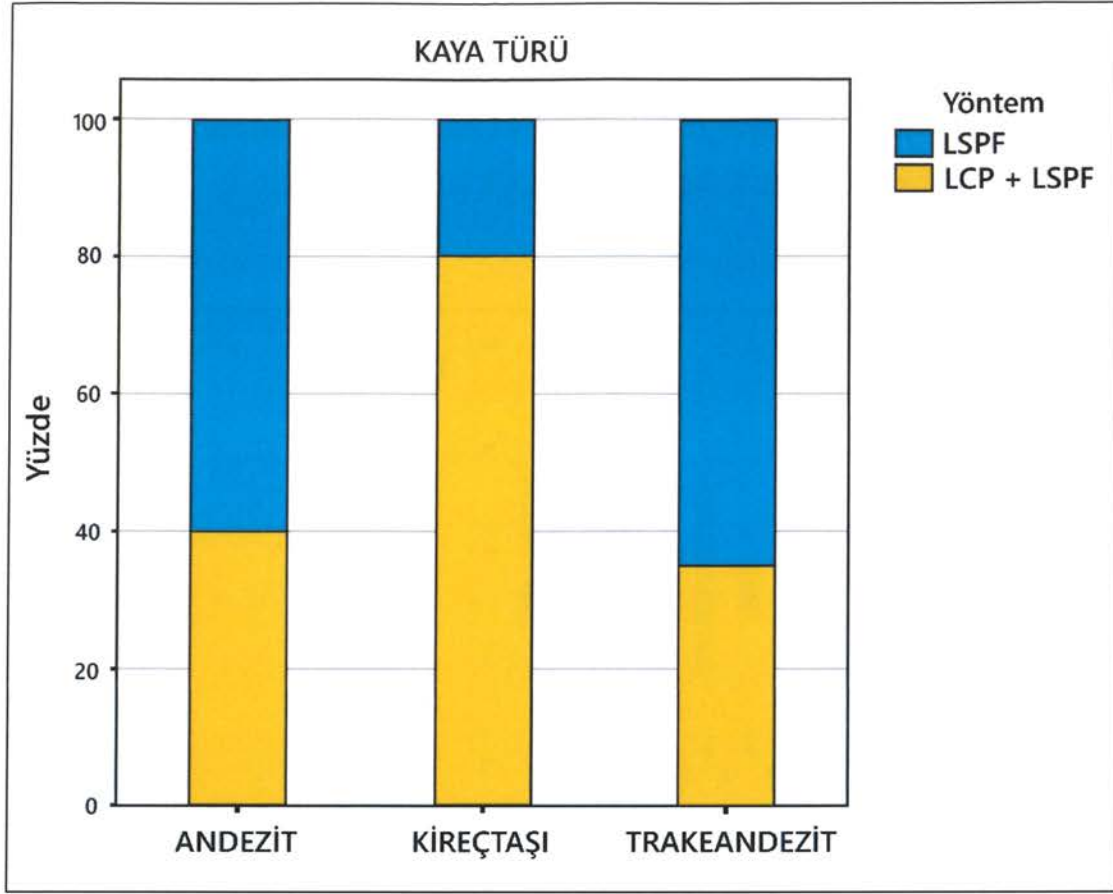
Yerinde ve nokta bulutunda ölçülen süreksizlik yönelimleri arasındaki farka ilişkin değerlendirme yapılırken göz önünde bulundurulmuş bir diğer süreksizlik özelliği de JRC'dir. Hat etüdü çalışmaları sırasında toplam 40 adet süreksizlik yüzeyinden pürüzlülük ölçümleri alınarak JRC değerleri tespit edilmiştir. Mevcut JRC ölçüm sayısı ile daha anlamlı sonuçlar elde edilebileceği düşünülerek, JRC

değerleri 0 – 10 ve 10 – 20 olarak iki farklı gruba ayrılmış ve değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Buna göre, JRC 0 – 10 için ortalama fark miktarı 4°, JRC 10 – 20 için ise 7° olarak hesaplanmıştır. Standart sapma değerleri ise JRC 0 – 10 ve JRC 10 – 20 için sırası ile 3° ve 7°'dir (Şekil 5.19).



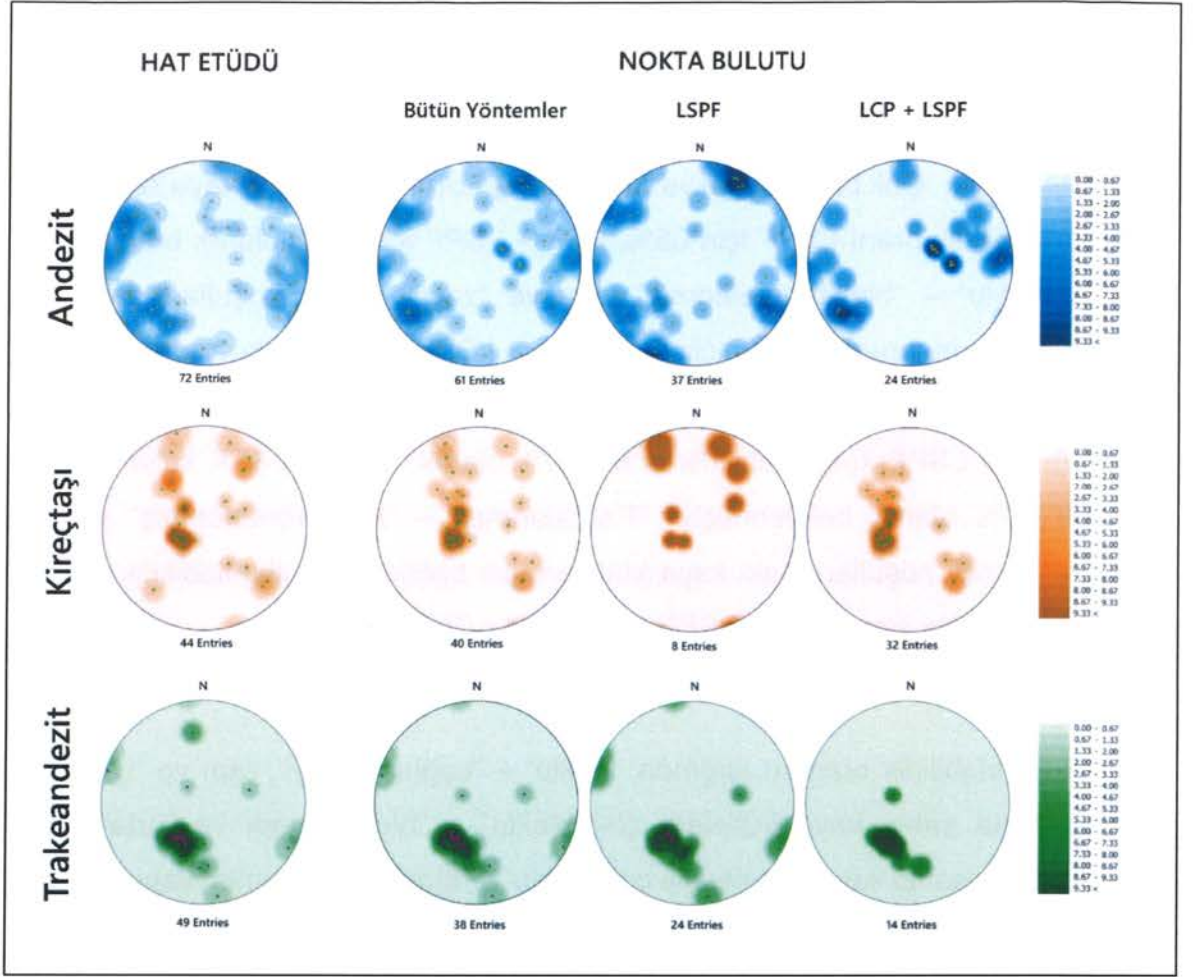
Şekil 5.19. JRC değerlerine göre ölçüm farklarını gösteren kutu grafikler; bütün değerler (a); gruplanmış değerler (b).

Çalışma kapsamında süreksizliklerin yapısal özelliklerinin nokta bulutu ve yerinde yönelim ölçümleri üzerindeki etkisinin yanı sıra, değerlendirilen bir diğer husus da LSPF ve LCP + LSPF yöntemlerinin kaya türü ve kaya kütle özelliklerine bağlı kullanılabilirlik durumudur. Buna göre Andezit türü kaya kütleleri için oluşturulan nokta bulutu verileri üzerinde alınan ölçümlerin 60%'ı için LSPF, 40%'ı için ise LCP + LSPF yöntemi kullanılmıştır. Kireçtaşı türündeki kaya kütleleri için bu oran 25% LSPF, 75% LCP + LSPF olarak; trakeandezit için ise 65% LSPF, 35% LCP + LSPF olarak belirlenmiştir (Şekil 5.20).



Şekil 5.20. LSPF ve LCP + LSPF yöntemlerinin kaya türlerine göre kullanım oranları.

Bu oranların yanı sıra, LSPF ve LCP + LSPF yöntemlerinin kaya türüne bağlı kullanım değerlendirilmesi stereografik projeksiyon üzerinde de yapılmıştır. Andezit, kireçtaşı ve trakeandezit kaya kütlelerinde ölçülen süreksizliklere ait yönelimlerin kutup noktalarının dağılımları stereonet üzerinde incelenmiştir (Şekil 5.21). Buna göre, kireçtaşı türündeki kaya kütleleri için LCP + LSPF yöntemi söz konusu olduğunda kutup noktalarına ait dağılımın belirgin şekilde yoğunlaştığı gözlemlenmektedir. Andezit ve trakeandezit türündeki kaya kütleleri için ise LSPF yöntemi ile ölçülen süreksizliklere ait kutup noktalarının daha yoğun olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 5.21. Süreksizlik kutup noktalarının farklı kaya türü, LSPF ve LCP + LSPF yöntemlerine göre yoğunlukları.

Yöntemlerin kullanılabilirlik koşullarına ilişkin bir diğer değerlendirme de GSI belirlenmesinde “Yapı” ve “Yüzey Kalitesi” parametrelerine göre yapılmıştır. Bu değerlendirme yapılırken her bir kaya mostrası için nokta bulutu verisi üzerinden LSPF ve LCP + LSPF yöntemleri ile ölçülen toplam süreksizlik sayılarının, sahada pusula ile doğrudan ölçülen toplam süreksizlik sayısına olan oranı belirlenmiştir. Belirlenen bu oranlar GSI tablosunda yapı ve yüzey kalitesine göre ait oldukları kaya kütlelerini temsil eden hücreye (Çizelge 5.1’de verilen GSI aralıklarına göre) yerleştirilmiştir (Şekil 5.22).

Bu yaklaşıma göre, “bloklı” – “sağlam/masif” yapıya ve “iyi” yüzey koşullarına sahip kaya kütlelerinde LSPF kullanılabilirlik oranı 55%, LCP + LSPF

kullanılabilirlik oranı 45% olarak belirlenmiştir. Bir diğer değerlendirme “çok bloklu” – “bloklu” yapı ve “iyi” yüzey koşullarına sahip kaya kütlelerinde yapılmış, LSPF kullanılabilirlik oranı 75%, LCP + LSPF kullanılabilirlik oranı 25% olarak belirlenmiştir. “Çok bloklu” yapı ve “orta” yüzey koşullarına sahip kaya kütlelerinde kullanılabilirlik oranı LSPF için 65%, LCP + LSPF için 35% olarak belirlenirken; “çok bloklu” – “bloklu/örselenmiş” yapı ve “zayıf” yüzey koşullarındaki kaya kütlelerinde bu oranlar LSPF için 40%, LCP + LSPF için 60% olarak belirlenmiştir. “Bloklu/örselenmiş” yapı “orta – iyi” yüzey koşullarındaki kaya kütleleri söz konusu olduğunda LSPF kullanılabilirlik oranı 20% olarak, LCP + LSPF kullanılabilirlik oranı 80% olarak belirlenmiştir. “Parçalanmış” – “bloklu/örselenmiş” yapı ve “zayıf” yüzey koşullarındaki kaya kütleleri için belirlenen kullanılabilirlik oranları LSPF için 10% iken, LCP + LSPF için 90%'dır (Şekil 5.22).

Bu kullanılabilirlik oranları ışığında; bloklu” – “sağlam/masif” yapı ve “iyi” yüzey koşullarına sahip kaya kütleleri, çok bloklu” – “bloklu” yapı ve “orta” yüzey koşullarına sahip kaya kütleleri ve çok bloklu” – “bloklu/örselenmiş” yapı ve “zayıf” yüzey koşullarına sahip kaya kütleleri için LSPF ve LCP + LSPF yöntemlerinin her ikisinin kullanımı da yüksek derecede önem taşımaktadır. “çok bloklu” – “bloklu” yapı ve “iyi” yüzey koşullarına sahip kaya kütleleri için LSPF yönteminin kullanılması yüksek derecede önem taşımakta olup, LCP + LSPF yönteminin bu yöntem ile birlikte kullanılması faydalı olacaktır Bloklu/örselenmiş” yapı ve “orta – iyi” yüzey koşullarındaki sahip kaya kütleleri, “Parçalanmış” – “bloklu/örselenmiş” yapı ve “zayıf” yüzey koşullarındaki kaya kütleleri için ise LCP + LSPF yönteminin kullanılması yüksek derecede önem taşımakta olup, LSPF yönteminin bu yöntem ile birlikte kullanılması faydalı olacaktır (Şekil 5.23).

	Çok pürüzlü, taze ayrılmamış yüzeyler.	Düz, çok az ayrılmış, demir oksit sıvamalı yüzeyler.	Düz, orta derecede ayrılmış yüzeyler.	Kaygan, sert veya köşeli parçalar içeren dolguya sahip çok ayrılmış yüzeyler.	Kaygan, yumuşak kil dolgulu, çok ayrılmış yüzeyler.
	ÇOK İYİ	İYİ	ORTA	ZAYIF	ÇOK ZAYIF
	AZALAN YÜZEY KALİTESİ ■■■■■→				
SAĞLAM VEYA MASİF Kaya malzemesi veya geniş aralıklı birkaç süreksizlik içeren masif kaya kütlesi.				UYGULANMAZ	UYGULANMAZ
BLOKLU 3 Ortogonal süreksizlik setinin oluşturduğu kübik bloklu, çok iyi kenetlenmiş, örselenmemiş kaya kütlesi.		55% LSPF 45% LCP + LSPF			
ÇOK BLOKLU 4 veya daha fazla sayıda süreksizlik takımlarının keşmesiyle oluşmuş çok yüzeyli-köşeli bloklar içeren kısmen örselenmiş kaya kütlesi.		75% LSPF 25% LCP + LSPF	65% LSPF 35% LCP + LSPF		
BLOKLU/ÖRSELENMİŞ Birbirini kesen çok sayıda süreksizliğin oluşturduğu köşeli bloklar içeren, kıvrımlanmış ve/veya faylanmaya maruz kalmış kaya kütlesi.		20% LSPF 80% LCP + LSPF		40% LSPF 60% LCP + LSPF	
PARÇALANMIŞ Köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının birlikteliğinden oluşan, zayıf kenetlenmiş, aşırı derecede kırıklı kaya kütlesi.				10% LSPF 90% LCP + LSPF	
LAMİNALI MAKASLANMIŞ İnce laminalı veya foliasyonlu ve makaslanmış zayıf kayalar. Sık aralıklı sistozite yüzeyleri kayada bloklaşmanın gelişmesini önlemiştir.	UYGULANMAZ	UYGULANMAZ			
	KAYA PARÇALANIRDA ARTAN KENETLENME KALİTESİ ■■■■■↑				

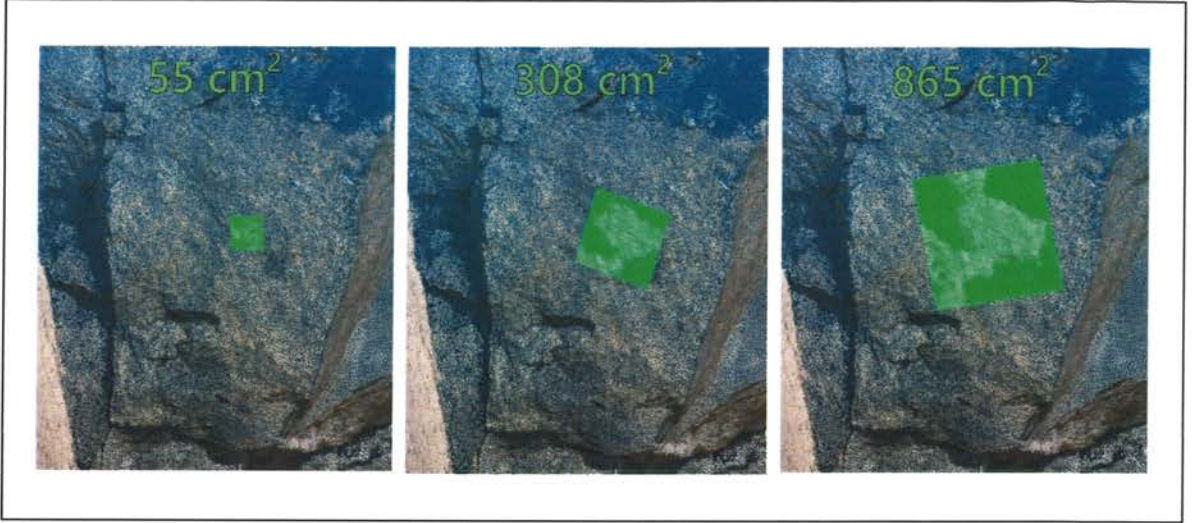
Şekil 5.22. LSPF ve LCP + LSPF yöntemlerinin kullanılabilirlik oranlarının GSI tablosu üzerinde yapı ve yüzey kalitesine göre gösterimi (Hoek ve Marinos, 2000'den değiştirilerek).

		Çok pürüzlü, taze ayrılmamış yüzeyler.	Düz, çok az ayrılmış, demir oksit sıvamaı yüzeyler.	Düz, orta derecede ayrılmış yüzeyler.	Kaygan, sert veya köşeli parçalar içeren dolguya sahip çok ayrılmış yüzeyler.	Kaygan, yumuşak kil dolulu, çok ayrılmış yüzeyler.		
		ÇOK İYİ	İYİ	ORTA	ZAYIF	ÇOK ZAYIF		
		AZALAN YÜZEY KALİTESİ ■■■■■➔						
<p>SAĞLAM VEYA MASİF Kaya malzemesi veya geniş aralıklı birkaç süreksizlik içeren masif kaya kütesi.</p> <p>BLOKLU 3 Ortogonal süreksizlik setinin oluşturduğu kübik bloklu, çok iyi kenetlenmiş, örselenmemiş kaya kütesi.</p> <p>ÇOK BLOKLU 4 veya daha fazla sayıda süreksizlik takımlarının kesişmesiyle oluşmuş çok yüzeyli-köşeli bloklar içeren kısmen örselenmiş kaya kütesi.</p> <p>BLOKLU/ÖRSELENMİŞ Birbirini kesen çok sayıda süreksizliğin oluşturduğu köşeli bloklar içeren, kırılmış ve/veya faylanmaya maruz kalmış kaya kütesi.</p> <p>PARÇALANMIŞ Köşeli ve yuvarlak kaya parçalarının birikteliğinden oluşan, zayıf kenetlenmiş, ağır derecede kırık kaya kütesi.</p> <p>LAMİNALİ MAKASLANMIŞ İnce laminali veya foliasyonlu ve makaslanmış zayıf kayalar. Sık aralıklı şistozite yüzeyleri kayada bloklanmanın gelişmesini önlemiştir.</p>	<p>KAYA PARÇALARINDA ARTAN KENETLENME KALİTESİ ■■■■■➔</p>				UYGULANMAZ	UYGULANMAZ		

Şekil 5.23. LSPF ve LCP + LSPF yöntemlerine ilişkin kullanım önerilerinin GSI tablosu üzerinde gösterimi (Hoek ve Marinos, 2000'den değiştirilerek).

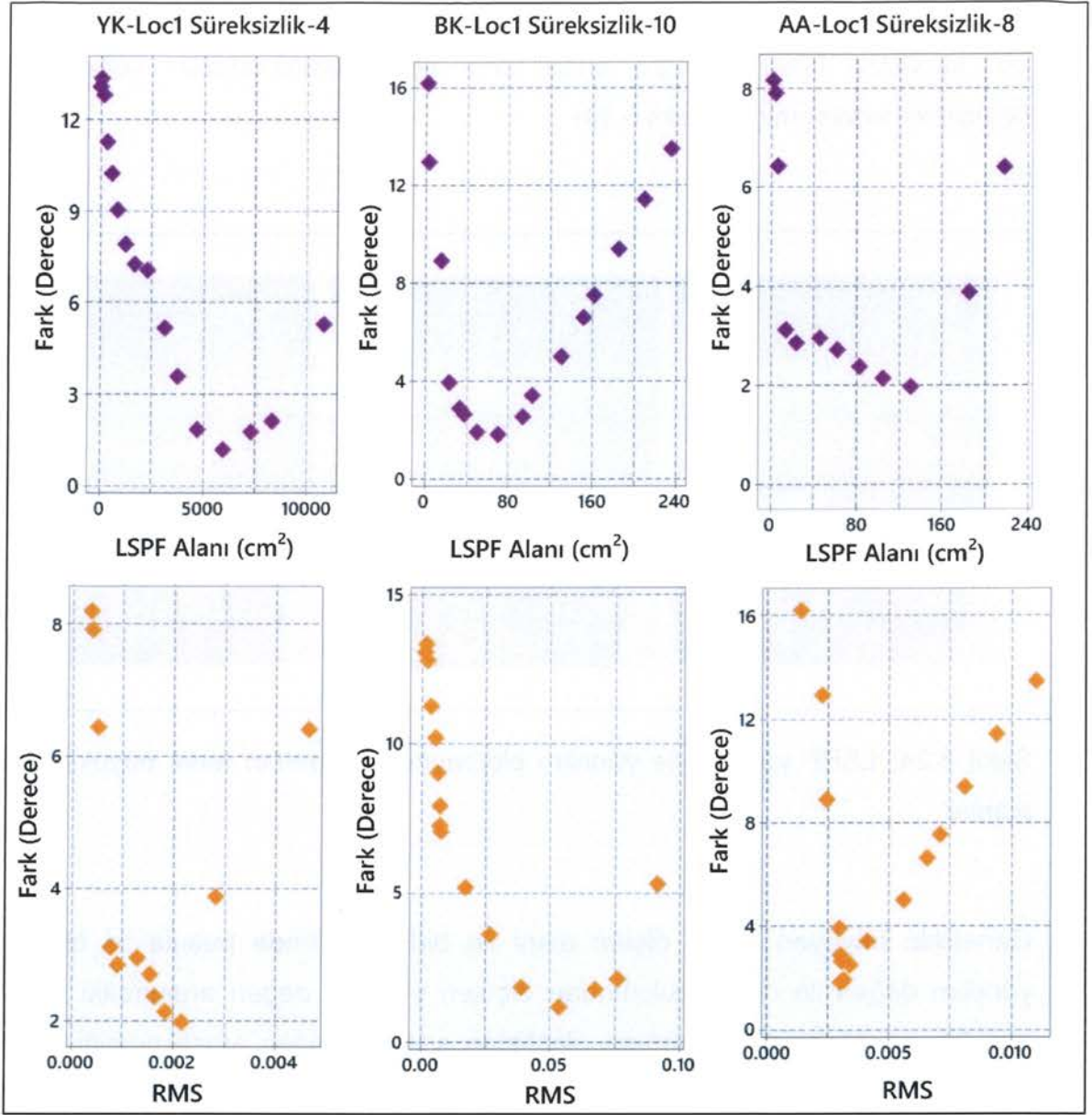
Yerinde ve nokta bulutunda ölçülen süreksizlik yönelimleri arasındaki fark miktarlarını doğrudan etkileyen bir diğer faktör de LSPF uygulanan yüzey alanının büyüklüğüdür. LSPF uygulanan alan büyüklükleri değiştikçe ölçüm farklarının da değiştiği tespit edilmiştir. Bu değişimlerin belirli bir koşul dahilinde oluşup

oluşmadığının sorgulanması adına LSPF ile yönelimi ölçülen her bir süreksizlik için küçükten büyüğe doğru artan farklı büyüklükteki alanlar kullanılarak değişimler incelenmiştir (Şekil 5.24).



Şekil 5.24. LSPF yöntemiyle yönelim ölçümünde kullanılan farklı büyüklükteki alanlar.

Genellikle büyüyen LSPF ölçüm alanı ile birlikte yerinde pusula ile ölçülen yönelim değeri ile nokta bulutundan ölçülen yönelim değeri arasındaki farkın azaldığı ve minimum bir değere ulaştıktan sonra yeniden artışa geçtiği tespit edilmiştir. Bu durum ideal durum olarak kabul edilmiş olup, ideal durumda tespit edilen bir diğer sonuç da, LSPF sonucunda elde edilen RMSE değerinin de ölçüm fark miktarları ile benzer değişimler gösterdiğiidir. Bu değişimleri sergileyen ideal duruma sahip 3 farklı örnek süreksizlik Şekil 5.25'de verilmiştir.



Şekil 5.25. LSPF yöntemi uygulanan alan büyüklüğü ve RMS değerlerinin değişimleri.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu araştırma kapsamında öncelikle, düşük maliyet ve kolay kullanıma sahip ekipmanlar aracılığıyla süreksizlik yönelimlerinin ölçülmesi amaçlanmıştır. Bu doğrultuda Öztürk ve ark. (2019)'da olduğu gibi görüntüler, akıllı telefon kullanılarak elde edilmiştir. Düşük maliyet ve kolay kullanım yaklaşımı jeoreferanslama işlemi için de ögz önünde bulundurulmuş olup, bu amaçla prizmatik karton bir kutu kullanılmıştır. Bu kullanım, jeoreferanslama için benzer çözümler üreten diğer çalışmaların (Francioni ve ark., 2019; García-Luna ve ark., 2019; ve Gregory-Lederer, 2020) aksine özel bir malzeme, tasarım ya da imalat gerektirmemiş arazide taşınması oldukça kolay basit bir kutu yardımıyla tamamlanmıştır. Sturzenegger ve Stead (2009)'in ifade ettiği gibi, fotogrametrik yöntemlerle oluşturulan 3B modele ait hassasiyet görüntü elde etme kalitesi ve görüntü çözünürlüğü ile doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda çalışma kapsamında oluşturulan nokta bulutu verileri ve ölçüm sonuçları dikkate alındığında görüntü elde etmek için akıllı telefon, jeoreferanslama için ise prizmatik bir kutu kullanmak güvenilir hassasiyette model üretebilmek için yeterli verileri sağlayabilmektedir.

Çalışma genelinde SfM fotogrametrisi ve süreksizlik yönelim ölçümleri arasındaki ilişki değerlendirilirken iki temel yaklaşım uygulanmıştır. Bunlardan ilki, hat etüdü ve nokta bulutu etüdü ile ölçülen süreksizlik yönelimlerine ait açıların karşılaştırılması ile elde edilen fark miktarları; ikincisi ise yöntemin uygulanabilirlik durumudur. Cawood ve ark. (2017), yönelim ölçüm farkları ve kullanılabilirlik değerlendirmelerini lidar, yersel SfM fotogrametrisi, hava SfM fotogrametrisi gibi farklı yöntemleri ile metot bazında yaparken; bu çalışmada düşük maliyetli SfM fotogrametrisi ile farklı kaya türü ve farklı yapısal özellikteki kaya kütlelerinin ölçümler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bir diğer deyişle, çalışma farklı fotogrametrik yöntemlerin karşılaştırılması üzerine değil, SfM fotogrametrisinin süreksizlik yönelim ölçümleri konusundaki çıktılarının jeolojik ve mühendislik jeolojisi açısından değerlendirilmesi üzerine inşa edilmiştir.

Literatürde yer alan Sturzenegger ve Stead (2009), Cawood ve ark. (2017) gibi çalışmalarda da sahada pusula ile ölçülen süreksizlik yönelimleri ve fotogrametrik

yöntemler yardımıyla ölçülen süreksizlik yönelimleri karşılaştırılmıştır. Fakat bu karşılaştırma yapılırken sahada ölçülen süreksizliklerin tamamı değil, belirli klavuz süreksizlikler kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında ise, hat etütlerinde yönelimleri ölçülen süreksizliklerin tamamı nokta bulutu üzerinde de ölçülerek ilgili değerlendirmeler yapılmıştır. Bu değerlendirmeler neticesinde elde edilen ilk sonuç, süreksizliklerin açık ya da kısmi kapalı olma durumuna göre nokta bulutu üzerinde farklı ölçüm yöntemlerinin kullanılması gerektiğidir. Açık süreksizlikler için LSPF, kısmi kapalı süreksizlikler için ise LCP + LSPF yöntemi kullanılmış olup, bütün sonuçlar değerlendirildiğinde nokta bulutu üzerinde yapılan yönelim ölçümlerinin kabul edilebilir miktarda olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ölçüm sonuçları iki yöntem için de ayrı ayrı ele alındığında LSPF yöntemine ait fark miktarlarının LCP + LSPF yöntemine kıyasla ise kısmen kabul edilebilir olduğu tespit edilmiştir. LCP + LSPF yönteminin fark miktarları LSPF'ye göre daha fazla olsa da, ölçüm yapılan kaya kütlelerinin temsil edilebilirliği açısından LCP + LSPF'nin kullanımı önem taşımaktadır.

Saha ve nokta bulutunda yapılan yönelim ölçümlerine ait fark miktarları kaya tipine göre ele alındığında çalışma yapılan andezit, kireçtaşı ve trakeandezit kütlelerinin hepsi için bu farkların kabul edilebilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Bununla birlikte fark miktarlarının kireçtaşı için fazla olmasının sebebi, sedimanter oluşumlardaki hakim süreksizlik tipinin tabakalanma yani kısmi kapalı süreksizlik şeklinde olması ve dolayısıyla LCP+LSPF metodunun kullanımına daha fazla başvurulmasıdır.

Çalışma kapsamındaki değerlendirmelerin bir diğeri de tekil süreksizlik özellikleri olan bozunma ve JRC özelinde yapılmıştır. Saha ve nokta bulutunda yapılan yönelim ölçümlerine ait fark miktarlarının bozunma derecesine bağlı değişimi göz önüne alındığında, bozunma derecesi arttıkça fark miktarının da kabul edilebilir oranda arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte bozunma derecesinin etkisi LSPF ve LCP + LSPF yöntemleri için ayrı olarak da değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda, bozunma derecesinin LSPF yöntemi için ciddi farklılık yaratacak ölçüde olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Bozunma derecesi süreksizlik

yüzeylerinin pürüzlülüğünün artmasına sebep olarak JRC değerini etkilemekte olup, nokta bulutunda yapılan yönelim ölçümleri üzerinde dolaylı bir etkiye sahiptir. LCP + LSPF yöntemi söz konusu olduğunda tıpkı LSPF'deki gibi bozunma derecesi yönelim ölçümleri üzerinde fark edilebilir bir etki yaratmamaktadır. Fakat, LSPF + LCP yöntemi ile yapılan ölçümlerde orta derecede bozunmuş süreksizlikler söz konusu olduğunda, az – orta derecede bozunmuş süreksizliklerde gerçekleştirilen ölçümlere kıyasla sahada alınan yönelim değerlerine daha yakın miktarlar ölçülmüştür. Bir diğer deyişle bozunma derecesi artmasına rağmen, saha ve nokta bulutunda ölçülen yönelim değeri farkları azalmıştır. Bunun sebebinin, kısmi kapalı süreksizlikler için bozunma derecesi arttıkça gerçekleşen fiziksel ayrışma ve parçalanmalar sonucunda gözlemlenebilen süreksizlik yüzey alanının artması ve dolayısıyla daha detaylı nokta bulutu verisinin üretilebilmesi olduğu düşünülmektedir.

Tez kapsamında saha ve nokta bulutunda yapılan yönelim ölçümlerine ait fark miktarlarının JRC'ye bağlı değişimi göz önüne alındığında, JRC arttıkça ölçüm farklarının da arttığı sonucu kolaylıkla ifade edilebilir.

LSPF yöntemi uygulanan süreksizlik yüzey alanları ve yönelim ölçümlerindeki değişimler göz önüne alındığında, süreksizlik yüzey alanının ölçümleri doğrudan etkilediği fakat bu etkinin belirli bir korelasyon içerisinde olmadığı sonucuna ulaşılmıştır. Daha önce de bahsedildiği üzere ideal durumda, büyüyen LSPF ölçüm alanı ile birlikte saha ve nokta bulutunda yapılan yönelim ölçümlerine ait fark miktarlarının ve RMSE'nin azalmakta olup ve minimum bir değere ulaştıktan sonra yeniden artışa geçmektedir. İdeal durumdaki bu sonuçtan hareketle, nokta bulutu üzerinde süreksizlik ölçümü yapan bir uzman mühendislik jeoloğu, RMSE sonuçlarının değişimlerini inceleyerek yaptığı yönelim ölçümlerinden hangisini kullanacağını belirleme şansına sahiptir.

Kullanılabilirlik için ilk değerlendirme kaya türlerinin temsil edilebilirliği ile ilgili olarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, LSPF ve LCP+LSPF yöntemlerinin beraber kullanımı çalışma yapılan bütün kaya türleri için tartışılmaz

önem taşımaktadır. Fakat bazı kaya türlerinde bazı yöntem ya da yöntemlerin kullanımının temsil edilebilirlik açısından fark edilebilir şekilde olarak ön plana çıktığı tespit edilmiştir. Buna göre, andezit tipi kaya türlerinde LSPF, kireçtaşı tipi kaya türlerinde LCP+LSPF, trakeandezit kaya türünde ise hem LSPF hem LCP+LSPF kullanımı kaya kütlelerinin temsil edilebilirliği için fark edilebilir şekilde ön plana çıkmaktadır.

GSI değerlerine bağlı kullanılabilirlik değerlendirmesi sonucunda ise kaya türü değerlendirmesine benzer sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde LSPF ve LCP+LSPF yöntemlerinin beraber kullanımı çalışma yapılan bütün süreksizlik yapı koşulları ve süreksizlik yüzey kalitesi derecelerinde tartışılmaz önem taşımaktadır. Fakat bazı süreksizlik yapı koşulları için bazı yöntem ya da yöntemlerin kullanımının temsil edilebilirlik açısından fark edilebilir şekilde olarak ön plana çıktığı tespit edilmiştir. Buna göre süreksizlik yapısı koşullarındaki bloklanma seviyesi arttıkça bir diğer deyişle kaya parçalarının kenetlenme seviyesi azaldıkça LCP+LSPF kullanımı kaya kütlelerinin temsil edilebilirliği için fark edilebilir şekilde ön plana çıkmaktadır. Fakat “bloklu” – “sağlam/masif” yapı ve “iyi” yüzey koşullarına sahip kaya kütleleri söz konusu olduğunda LCP+LSPF kullanım ihtiyacı söz konusu olmaktadır. Bunun sebebi kaya kütlelerindeki bloklanma seviyesi azaldıkça açık süreksizliklerin azalıp kısmi kapalı süreksizliklerin artması, bir diğer deyişle bloklu yapının yerini masif ve çatlaklı yapının almasıdır.

Tez kapsamında elde edilen sonuçlar, gelecekte yapılacak çalışmalar için bazı önerilerin temelini de oluşturmuştur. Bu kapsamdaki ilk öneri; daha farklı kaya türlerinde daha fazla ölçüm alınan çalışmaların yapılmasıdır. Buna benzer olarak, daha geniş GSI aralıklarını kapsayacak şekilde yapılacak çalışmalar da SfM fotogrametrisinin süreksizlik etütlerindeki performansının değerlendirilmesi açısından faydalı olacaktır. Bununla birlikte jeoreferanslama için prizmatik kutu kullanımının farklı büyüklük ve derinlikteki şevlerde test edilmesi, yöntemin performansının belirlenmesi açısından önem taşımaktadır. Farklı yaklaşım gerektiren bir diğer konu da, nokta bulutu üzerinde yapılan ölçümlerde kullanılan

algoritmalarıdır. Kaya türü ve kaya kütle özellikleri gibi mühendislik jeolojisi özelliklerinin, bu algoritmalar üzerindeki etkileri tartışılması gerektiği düşünülen hususlardandır. LSPF ve LCP+LSPF'ye alternatif olabilecek farklı algoritmaların kullanımı değerlendirilirken bu çalışmada olduğu gibi kaya türü ve kaya kütle özelliklerinin de göz önünde bulundurulması önerilmektedir.

7. KAYNAKLAR

- A. Gaich, A. Fasching, W. Schubert, Determining Structural Rock Mass Parameters Using a Computer Vision System, *Felsbau*. 21 (2003) 46–50.
- A. Gaich, A. Fasching, W. Schubert, Geotechnical data collection supported by computer vision, *Rock Mech; A Chall. Soc. Balkema*. (2001) 65–70.
- A. Lucieer, S.M. de Jong, D. Turner, Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography, *Prog. Phys. Geogr. Earth Environ*. 38 (2013) 97–116.
- A. Riquelme, M. Cano, R. Tomás, A. Abellán, Identification of Rock Slope Discontinuity Sets from Laser Scanner and Photogrammetric Point Clouds: A Comparative Analysis, *Procedia Eng*. 191 (2017) 838–845.
- A.F. Habib, *Digital Photogrammetric Systems Lecture Notes*, 2016.
- A.I. Okay, C. Göncüoğlu, The Karakaya Complex: A review of data and concepts, *Turkish J. Earth Sci*. 13 (2004) 77–95.
- A.J. Cawood, C.E. Bond, J.A. Howell, R.W.H. Butler, Y. Totake, LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage and the effects on structural models, *J. Struct. Geol*. 98 (2017) 67–82.
- A.M.C. Şengör, Y. Yılmaz, Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach, *Tectonophysics*. 75 (1981) 181–241.
- B. Akyürek, E. Bilginer, B. Akbaş, N. Hemşin, Ş. Pehlivan, O. Altın, Y. Soysal, E. Dauer, E. Çatal, B. Sözeri, H. Yıldırım ve Y. Hakyemez, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi: Ankara-Elmadağ-Kalecik Dolayının Temel Jeoloji Özellikleri*, c. 8, (1984), sayı 2.
- B. Akyürek, M. Duru, Y.F. Sütçü, İ. Papak, F. Şaroğlu, N. Pehlivan, O. Gönenç, S. Granit, T. Yaşar, 1:100 000 ölçekli açınsama nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, (MTA) Ankara F 15 Paftası, 1997.
- C. Stachnissi, *Photogrammetry I, Lecture Notes*, 2020.

- C. Vanneschi, M. Di Camillo, E. Aiello, F. Bonciani, R. Salvini, SfM-MVS Photogrammetry for Rockfall Analysis and Hazard Assessment Along the Ancient Roman Via Flaminia Road at the Furlo Gorge (Italy), *ISPRS Int. J. Geo-Information*. 8 (2019).
- C. Vanneschi, M. Eyre, M. Francioni, J. Coggan, The Use of Remote Sensing Techniques for Monitoring and Characterization of Slope Instability, *Procedia Eng.* 191 (2017) 150–157.
- D. Girardeau-Montaut, Cloud Compare: 3D point cloud and mesh processing software, open-source project, Version 2.10.2, 2016.
- D. Kong, C. Saroglou, F. Wu, P. Sha, B. Li, Development and application of UAV-SfM photogrammetry for quantitative characterization of rock mass discontinuities, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 141 (2021).
- D. M. Rose-Brown, Aspects Of Slope Design In Open Pit Mining. PhD Thesis, London University, 1973.
- D.G. Lowe, Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints, *Int. J. Comput. Vis.* 60 (2004) 91–110.
- E. Hoek, E.T. Brown, The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition, *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 11 (2019) 445–463.
- E. Hoek, P. Marinos, Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. Part 1: Estimating rock mass strength, in: *Tunnels Tunn. Int. Part*, (2000) 1–22.
- E. Varol, A. Temel, A. Gourgaud, H. Bellon, Early Miocene adakite-like volcanism in the Balkuyumcu region, central Anatolia, Turkey: Petrology and geochemistry, *J. Asian Earth Sci.* 30 (2007) 613–628.
- F. Clapuyt, V. Vanacker, K. Van Oost, Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms, *Geomorphology*. 260 (2016) 4–15.
- G. Firpo, R. Salvini, M. Francioni, P.G. Ranjith, Use of Digital Terrestrial Photogrammetry in rocky slope stability analysis by Distinct Elements Numerical Methods, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 48 (2011) 1045–1054.

- G. Konecny, Geoinformation Remote Sensing, Photogrammetry and Geographical Information Systems, cRc Press, **2008**.
- G. Papathanassiou, A. Riquelme, T. Tzevelekis, E. Evaggelou, Rock Mass Characterization of Karstified Marbles and Evaluation of Rockfall Potential Based on Traditional and SfM-Based Methods; Case Study of Nestos, Greece, *Geosci.* 10 (**2020**).
- G. Seyitoglu, G. Buyukonal, Geochemistry of Ankara volcanics and the implications of their K-Ar dates on the Cenozocic stratigraphy of central Turkey, *Turkish Journal of Earth Sciences* 4 (**1995**) 87–92.
- G.H. Erharter, D.S. Kieffer, C. Prager, UAV-Based Discontinuity Analyses and Rock Fall Source Mapping in Alpine Terrain (Pletzachkogel/Tyrol/Austria) BT- IAEG/AEG Annual Meeting Proceedings, San Francisco, California, 2018 - Volume 1, in: A. Shakoor, K. Cato (Eds.), Springer International Publishing, Cham, **2019**.
- H.S. Ozturk, S. Kocaman, C. Gokceoglu, A low-cost approach for determination of discontinuity orientation using smartphone images and application to a part of Ihlara Valley (Central Turkey), *Eng. Geol.* 254 (**2019**) 63–75.
- ISRM, 2007. The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006. In: Ulusay, Hudson (Eds.), Suggested methods prepared by the commission on testing methods, International Society for Rock Mechanics, ISRM Turkish National Group, Ankara, **2007**.
- İstanbul Üniversitesi Açık ve Uzaktan Eğitim Fakültesi Fiziki Coğrafya Ders Notları
- J. Ehlen, R.A. Hevenor, J.M. Kemeny, K. Girdner, Fracture recognition in digital imagery, 35th U.S. Symp. Rock Mech. (**1995**) 141–146.
- J. Kemeny, R. Post, Estimating three-dimensional rock discontinuity orientation from digital images of fracture traces, *Comput. Geosci.* 29 (**2003**) 65–77

- J.L. Carrivick, M.W. Smith, D.J. Quincey, *Structure from Motion in the Geosciences*, John Wiley & Sons, **2016**.
- J.S. Aber, I. Marzloff, J.B. Ries, S.E.W. Aber, Chapter 3 - Principles of Photogrammetry, in: J.S. Aber, I. Marzloff, J.B. Ries, S.E.W.B.T.-S.-F.A.P. and U.A.S.I. (Second E. Aber (Eds.), Academic Press, **2019**.
- K. Kraus, *Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans*, De Gruyter, **2011**.
- K. Linkwitz, *Terrestrisch-photogrammetrische Kluftrmessung*, *Rock Mech. Eng. Geol. I.* (**1963**).
- L. Jordá Bordehore, A. Riquelme, M. Cano, R. Tomás, Comparing manual and remote sensing field discontinuity collection used in kinematic stability assessment of failed rock slopes, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 97 (**2017**) 24–32.
- L.C. Peltier, The Geographic Cycle in Periglacial Regions as it is Related to Climatic Geomorphology, *Ann. Assoc. Am. Geogr.* 40 (**1950**) 214–236.
- M. Azarafza, A. Ghazifard, H. Akgün, E. Asghari-Kaljahi, Development of a 2D and 3D computational algorithm for discontinuity structural geometry identification by artificial intelligence based on image processing techniques, *Bull. Eng. Geol. Environ.* 78 (**2019**).
- M. Favalli, A. Fornaciai, I. Isola, S. Tarquini, L. Nannipieri, Multiview 3D reconstruction in geosciences, *Comput. Geosci.* 44 (**2012**) 168–176.
- M. Francioni, M. Simone, D. Stead, N. Sciarra, G. Mataloni, F. Calamita, A New Fast and Low-Cost Photogrammetry Method for the Engineering Characterization of Rock Slopes, *Remote Sens.* 11 (**2019**).
- M. Gregory-lederer, *Digital Commons - Montana Tech Nadir and oblique UAV photogrammetry techniques for quantitative rock fall evaluation in the rimrocks of southcentral Montana*, Montana Tech University, **2020**.
- M. Jaud, M. Kervot, C. Delacourt, S. Bertin, Potential of Smartphone SfM Photogrammetry to Measure Coastal Morphodynamics, *Remote Sens.* 11 (**2019**).

- M. Pötsch, W. Schubert, A. Gaich, Application of metric 3D images of rock faces for the determination of the response of rock slopes to excavation, *Impact Hum. Act. Geol. Environ. - Proc. Int. Symp. Int. Soc. Rock Mech. Eurock 2005*. (2005) 489–497.
- M. Sayab, D. Aerden, M. Paananen, P. Saarela, Virtual Structural Analysis of Jokisivu Open Pit Using ‘Structure-from-Motion’ Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Photogrammetry: Implications for Structurally-Controlled Gold Deposits in Southwest Finland, *Remote Sens.* 10 (2018).
- M. Sturzenegger, D. Stead, Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts, *Eng. Geol.* 106 (2009) 163–182.
- M.A. Fischler, R.C. Bolles, Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Commun. ACM.* 24 (1981) 381–395.
- M.A. Fonstad, J.T. Dietrich, B.C. Courville, J.L. Jensen, P.E. Carbonneau, Topographic structure from motion: A new development in photogrammetric measurement, *Earth Surf. Process. Landforms.* 38 (2013) 421–430.
- M.J. Lato, M. Vöge, Automated mapping of rock discontinuities in 3D lidar and photogrammetry models, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 54 (2012) 150–158.
- M.J. Westoby, J. Brasington, N.F. Glasser, M.J. Hambrey, J.M. Reynolds, ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications, *Geomorphology.* 179 (2012) 300–314.
- N. Barton, V. Choubey, The shear strength of rock joints in theory and practice, *Rock Mech.* 10 (1977).
- N. Görür, F.Y. Oktay, İ. Seymen, A.M.C. Şengör, Palaeotectonic evolution of the Tuzgölü basin complex, Central Turkey: sedimentary record of a Neo-Tethyan closure, *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* 17 (1984) 467 LP – 482.

- N. Menegoni, D. Giordan, C. Perotti, D.D. Tannant, Detection and geometric characterization of rock mass discontinuities using a 3D high-resolution digital outcrop model generated from RPAS imagery – Ormea rock slope, Italy, *Eng. Geol.* 252 (2019) 145–163.
- N. Rengers, Terrestrial Photogrammetry: A valuable tool for engineering geological purposes, *Rock Mech. Eng. Geol. V.* (1967).
- N. Snavely, S.M. Seitz, R. Szeliski, Modeling the World from Internet Photo Collections, *Int. J. Comput. Vis.* 80 (2008) 189–210.
- O. ve D. Tüysüz A. A., Çankırı Havzasının Tektonik Birlikleri ve Havzanın Tektonik Evrimi, Türkiye 9. Pet. Kongresi, *Bildir. Jeol.* (1992) 333–349.
- P. An, K. Fang, Q. Jiang, H. Zhang, Y. Zhang, Measurement of Rock Joint Surfaces by Using Smartphone Structure from Motion (SfM) Photogrammetry, *Sensors*, 21 (2021).
- P.R. Wolf, B.A. Dewitt, B.E. Wilkinson, Elements of Photogrammetry with Applications in GIS, Fourth edi, McGraw-Hill Education, New York, 2014.
- Q. Feng, K. Röshoff, A Survey of 3D Laser Scanning Techniques for Application to Rock Mechanics and Rock Engineering, in: *ISRM Suggest. Methods Rock Charact. Test. Monit. 2007-2014*, 2015.
- R. García-Luna, S. Senent, R. Jurado-Piña, R. Jimenez, Structure from Motion photogrammetry to characterize underground rock masses: Experiences from two real tunnels, *Tunn. Undergr. Sp. Technol.* 83 (2019) 262–273.
- R. Hartley, A. Zisserman, Multiple View Geometry in Computer Vision, 2nd ed., Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
- R. Roncella, G. Forlani, F. Remondino, Photogrammetry for geological applications: automatic retrieval of discontinuity orientation in rock slopes, in: *Videometrics VIII*, 2005.
- R. Salvini, M. Francioni, S. Riccucci, P.L. Fantozzi, F. Bonciani, S. Mancini, Stability analysis of “Grotta delle Felci” Cliff (Capri Island, Italy): structural, engineering–geological, photogrammetric surveys and laser scanning, *Bull. Eng. Geol. Environ.* 70 (2011) 549–557.

- R. Szeliski, Computer vision: algorithms and applications, Springer Science & Business Media, **2010**.
- R. Ulusay, H. Sönmez, Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri, JMO Yayınları, Ankara, **2007**.
- R.E. Goodman, Introduction to rock mechanics, Wiley New York, **1989**.
- S. A. Kocaman, Sensor modeling and validation for linear array aerial and satellite imagery, Doctoral dissertation, ETH Zurich, **2008**.
- S. Jiang, C. Jiang, W. Jiang, Efficient structure from motion for large-scale UAV images: A review and a comparison of SfM tools, ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 167 (**2020**) 230–251.
- S.D. Priest, Discontinuity Analysis for Rock Engineering, Chapman and Hall, London, **1993**.
- S.P. Bemis, S. Micklethwaite, D. Turner, M.R. James, S. Akciz, S.T. Thiele, H.A. Bangash, Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology, J. Struct. Geol. 69 (**2014**) 163–178.
- S.T. Thiele, L. Grose, A. Samsu, S. Micklethwaite, S.A. Vollgger, A.R. Cruden, Rapid, semi-automatic fracture and contact mapping for point clouds, images and geophysical data, Solid Earth. 8 (**2017**) 1241–1253.
- T. Cao, A. Xiao, L. Wu, L. Mao, Automatic fracture detection based on Terrestrial Laser Scanning data: A new method and case study, Comput. Geosci. 106 (**2017**) 209–216.
- T. Luhmann, S. Robson, S. Kyle, J. Boehm, Close-range photogrammetry and 3D imaging, de Gruyter, Berlin/Boston, **2019**.
- T.M. Lillesand, R.W. Kiefer, chipman, JW 2004, Remote Sens. Image Interpret. John Wiley & Sons, New York, **2004**.
- U. Bilgutay, Geology of the Hasanoglan-Ankara region, Bulletin of the Mineral Research and Exploration 54, (**1960**), 44–51.

- V. Bonilla-Sierra, L. Scholtès, F. V Donzé, M.K. Elmoultie, Rock slope stability analysis using photogrammetric data and DFN–DEM modelling, *Acta Geotech.* 10 (2015) 497–511.
- W. Greenwood, D. Zekkos, J. Lynch, J. Bateman, M.K. Clark, D. Chamlagain, UAV-based 3-D characterization of rock masses and rock slides in Nepal, 50th U.S. Symp. Rock Mech, 4 (2016) 3027-3035.
- W. Linder, *Digital photogrammetry*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- W.C. Haneberg, Using close range terrestrial digital photogrammetry for 3-D rock slope modeling and discontinuity mapping in the United States, *Bull. Eng. Geol. Environ.* 67 (2008) 457–469.
- W.Y. Tung, S.K. Nagendran, M.A. Mohamad Ismail, 3D rock slope data acquisition by photogrammetry approach and extraction of geological planes using FACET plugin in CloudCompare, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 169 (2018) 12051.
- Y. Lee, D.-W. Ryu, H.-K. Lee, An Application of Stereophotogrammetry in Investigating Rock Discontinuity Orientation, *Geosystem Eng.* 3 (2000) 71–80.
- Y. Zhang, P. Yue, G. Zhang, T. Guan, M. Lv, D. Zhong, Augmented Reality Mapping of Rock Mass Discontinuities and Rockfall Susceptibility Based on Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry, *Remote Sens.* 11 (2019).

